

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

探討高溫超導體 YBCO 內由於磁通子移動所產生之感應電場

計畫編號：NSC92-2112-M-032-017

執行時間：92 年 8 月 1 日 至 93 年 7 月 31 日

計畫主持人：陳偉正

處理方式：可立即對外提供參考

執行單位：淡江大學物理系
中華民國 93 年 8 月 20 日

摘要

本計畫的主要目的在研究高溫超導體 YBCO 在變動的磁場下，由於法拉第感應定律，所產生的感應電壓。我們利用直流馬達帶動一對 S、N 極分別朝下的磁鐵，在樣品的上方旋轉，以產生在樣品上方變動的磁場。並且分別在各種溫度，外加偏流 0~100mA 的電流下量測其感應電壓。我們發現在超導轉換溫區時，感應電壓突然變大，到了完全超導態之後，電壓又減小為與正常態相同的感應電壓大小。推測原因，是因為超導轉變溫區時，超導體內磁通子的運動關係。

關鍵字： (1)YBCO 超導體 (2)磁通子 (3)混合態.

Abstract :

We have investigated the induced electric voltage due to the Faraday's law of YBCO superconductors under the moving magnetic fields. The way we produce the moving magnetic field is to use a D.C. motor to turn a pair of magnets place above the sample.

We measure the induced electric voltages at different temperatures and different bias direct current from 0 to 100mA. We found that the induced electric voltage has suddenly become very large at the transition region. We think this maybe due to the fluxoid moving inside the YBCO superconductor.

Keywords: (1) YBCO superconductor (2) Fluxoid (3) Mixed State.

目 錄

第一章 導論	48
第二章 樣品與實驗設備	49
2-1 單顆粒 (Single Grain) 的製作	49
2-2 樣品 $\text{Sm}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 塊材 (晶種) 的製作	50
2-3 樣品 $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 塊材的製作	53
2-4 實驗儀器	66
2-4.1 製作樣品塊材之裝置	66
2-4.2 實驗系統架構之裝置	68
2-5 樣品所使用的相關粉末	70
第三章 實驗方法與步驟	71
3-1 實驗方法與系統架構	71
3-1.1 真空低溫系統架構	71
3-1.2 樣品薄片的製作與放置	71
3-1.3 可變頻磁場	72
3-1.4 程式控制	73
3-1.5 讀取數據	73
3-2 實驗流程與步驟	74
3-2.1 加磁場後，磁場影響的臨界溫度	74
3-2.2 轉動磁場引起的感應電壓變化	75
3-2.3 在不同頻率的轉動磁場下，加電流引起的感應 電壓變化	76
第四章 結果與討論	87
4-1 加磁場臨界溫度變化的數據分析	87
4-2 觀察與分析轉動磁場與感應電壓	88
4-3 觀察加電流通過樣品所引起的感應電壓變化	91

第五章 結論	26
參考文獻	28

第一章 導論

當外加磁場大於第二類超導體的下臨界磁場 (H_{c1}) 時，磁力線以渦旋線的方式進入超導體內部。若有一電流加在垂直於磁場的方向，則渦旋線會受到一個 Lorentz 力的作用[1]。

對於理想的第二類超導體而言，磁力線會在超導體內運動；而對於非理想的第二類超導而言，其中的缺陷會阻礙渦旋線的運動，我們將抵抗渦旋線運動的力稱為釘扎力。故當外磁場一定，電流必須達到一定大小，渦旋線才會運動。渦旋線的移動會在超導體內阻礙電子的流動，產生電阻，稱磁流阻。在超導體的研究中，磁通流動的現象一直是大家所想探討、了解的地方[2]。

在實驗方面，常藉著超導體中釘扎中心的濃度與排列的不同，做磁通流動的討論；而本實驗則是利用磁場的變化去探討磁通流動。我們在樣品上方，利用直流馬達帶動一對磁鐵旋轉，兩個磁鐵的 S、N 極分別向下。而由法拉第定律可知，當我們外加一變動的磁場在樣品面的上方運動，可以引起超導體邊緣的感應電流流動。感應電流將影響磁通子的流動，產生的磁流阻也相對的造成感應電壓變化[3-5]。藉由讀取感應電壓，我們將可推測感應電流與磁通流動之間的關係。感應電壓的變化與磁通子流動的關係就是本實驗的主體。

第二章 樣品與實驗設備

2-1 單顆粒 (Single Grain) 的製作

本實驗所使用的 YBCO 超導體是利用傳統的高溫燒結法燒製而成。我們希望所燒結成的樣品內每一 Grain 越大越好，將 $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 經三次預燒後，再加以莫耳數比為 40% 的 $\text{Y}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_5$ 為助溶劑，混合均勻，並配合 SmBaCuO 塊材當作晶種，再燒結達千度以上，最後再進行補氧過程。我們可以得到顆粒較大的塊材超導體[6]。

在大多數的應用中，塊材都需要大尺寸的實用形狀，因為氧化物超導體具有很高的異方性，所以可以利用接晶種 (seeding) 的方式來控制結晶方向；也就是說在 YBCO 混合的塊材上放置一具有特別方向性的單晶，利用它來成長大的單晶粒超導體；而我們乃利用 SmBaCuO 單晶為晶種，主要的原因是因為它有與 YBCO 相近的晶格常數，以及熔點高於等等。

所以第一步，我們先燒結塊材。燒結好的塊材敲碎之後撿取具有光滑晶面的正方體，放置於 YBCO 上作為晶種。第二步，再把加了晶種的 YBCO 燒結成形。最後第三步，就是補氧的工作。燒好的 YBCO 及 SmBaCuO 塊材，如圖(2-1)。

以下是詳細的樣品製作流程：

2-2 樣品 $\text{Sm}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 塊材（晶種）的製作

(1) $\text{Sm}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的製作

A. 配粉：

首先將 Sm_2O_3 (Sm_2O_3 99.99 %)，碳酸鋇 (BaCO_3 99.99 %) 和氧化銅 (CuO 99.99%) 三種粉末在電子天秤上依重量比 3.4698 : 11.7813 : 4.7489 量取好，使其莫耳數比為 $\text{Sm} : \text{Ba} : \text{Cu} = 1 : 2 : 3$ ，混合後在研磨機內研磨，使這三種粉末能夠均勻混合，以利可以完全反應，約 50 分後取出混合均勻之灰色粉末。

B. 預燒（需三次）：

將混合後的均勻之灰色粉末放置在氧化鋁瓷舟 (boat) 中，送進高溫爐內開始加熱預燒，利用微電腦控制升溫流程至 850 °C，持溫 8 小時，爐門關閉自然降溫冷卻後取出。此為第一次預燒。

將第一次預燒後的粉末塊取出，放入研鉢中敲碎，然後以研杵加以研磨成粉末（為了以利在研磨機中之研磨），在倒入研磨機內研磨約 50 分鐘，使粉末均勻。再次放入高溫爐內進行第二次預燒。

將第二次預燒完成的粉末塊取出，將粉末研磨均勻以方便於

第三次預燒。其預燒程式同第二次預燒。

將三次預燒完成後的粉末，加以研磨均勻，就是預燒完成的黑色粉末。以上三次預燒條件可見圖(2-2)。

簡單的實驗流程說明：

決定 $\text{Sm}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的成分 → 依成分配粉 → 混合均勻 → 進行第一次預燒(850 °C) → 取出後細磨 → 再次進行第二次預燒(900 °C) → 再次取出細磨均勻 → 進行第三次預燒(900 °C) → 取出並細磨 → 完成三次預燒之粉末

(2) $\text{Sm}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_{5-\delta}$ 的製作

A. 配粉：

首先將 Sm_2O_3 (Sm_2O_3 99.99 %)，碳酸鋇 (BaCO_3 99.99 %) 和氧化銅 (CuO 99.99 %) 三種粉末在電子天秤上依重量比 11.148 : 6.309 : 2.543 量取好，使其莫耳數比為 $\text{Sm} : \text{Ba} : \text{Cu} = 2 : 1 : 1$ ，混合後在研磨機內研磨，使這三種粉末能夠均勻混合，以利可以完全反應，約 50 分後取出混合均勻之灰色粉末。

B. 預燒（需三次）：

將混合後的均勻之灰色粉末放置在氧化鋁瓷舟 (boat) 中，送進高溫爐內開始加熱預燒，利用微電腦控制升溫流程至 870

°C，持溫 8 小時，爐門關閉自然降溫冷卻後取出。此為第一次預燒。

將第一次預燒後的粉末塊取出，放入研鉢中敲碎，然後以研杵加以研磨成粉末（為了以利在研磨機中之研磨），在倒入研磨機內研磨約 50 分鐘，使粉末均勻。再次放入高溫爐內進行第二次預燒。

將第二次預燒完成的粉末塊取出，將粉末研磨均勻以方便於第三次預燒。其預燒程式同第二次預燒。

將三次預燒完成後的粉末，加以研磨均勻，就是預燒完成的鮮綠色粉末。以上三次預燒條件可見圖(2-3)。

簡單的實驗流程說明：

決定 $\text{Sm}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的成分 → 依成分配粉 → 混合均勻 → 進行第一次預燒(870 °C) → 取出後細磨 → 再次進行第二次預燒(930 °C) → 再次取出細磨均勻 → 進行第三次預燒(930 °C) → 取出並細磨 → 完成三次預燒之粉末

(3) 混合 $\text{Sm}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 和 $\text{Sm}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_{5-\delta}$

秤取適當重量的 $\text{Sm}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_{5-\delta}$ 和 $\text{Sm}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_{5-\delta}$ ，使得莫耳數比為 60:40（其中 Sm211 的比例由 5 % ~ 40 % 皆可，但以 30 %

~40 %之效果最好，此處我們統一取用 40 %的 Sm211；Sm123 與 Sm211 經計算後的重量比為 8.48：4.52，一顆塊材的總重為 13 克。），然後放入研磨鉢中充分混合均勻（此處不以研磨鉢研磨的原因與製作 YBCO 塊材相同：一是怕因研磨鉢研磨而損失太多的粉末，造成重量不足；二是容易造成粉末的污染。）再由實驗室自製之壓模機以 400 kg/cm^2 壓力壓模成直徑 24 mm 的樣品，並將 3mm^2 大小的 MgO 單晶片（Cubic 結構，熔點高，約 3000 K。）置於 SmBaCuO 塊材上，再把樣品置於氧化鋁瓷舟背面上，送入箱型高溫爐內進行燒結，微電腦控溫程序條件如圖(2-4)。

塊材燒結完成後至室溫取出，值得注意的是在 SmBaCuO 燒結完成的塊材中，經常可以發現些許的小孔洞，所以我們加入 CeO_2 （約總重量比 0.5%）即可減少孔洞的出現，以利樣品的成長。

2-3 樣品 $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 塊材的製作

(1) $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的製作

A. 配粉：

首先將氧化釔（ Y_2O_3 99.99%），碳酸鋇（ BaCO_3 99.99%）和氧化銅（ CuO 99.99%）三種粉末在電子天秤上依重量比 3.0261：10.5781：6.3959 量取好，使其莫耳數比為 $\text{Y}:\text{Ba}:\text{Cu} = 1:2:3$ ，

混合後在研磨機內研磨，使這三種粉末能夠均勻混合，以利可以完全反應，約 50 分後取出混合均勻之灰色粉末。

B. 預燒（需三次）：

將混合後的均勻之灰色粉末放置在氧化鋁瓷舟（boat）中，送進高溫爐內開始加熱預燒，利用微電腦控制升溫流程至 850°C，持溫 8 小時，爐門關閉自然降溫冷卻後取出。此為第一次預燒。

將第一次預燒後的粉末塊取出，放入研鉢中敲碎，然後以研杵加以研磨成粉末（為了以利在研磨機中之研磨），在倒入研磨機內研磨約 50 分鐘，使粉末均勻。再次放入高溫爐內進行第二次預燒。

將第二次預燒完成的粉末塊取出，將粉末研磨均勻以方便於第三次預燒。其預燒程式同第二次預燒。

將三次預燒完成後的粉末，加以研磨均勻，就是預燒完成的黑色粉末。以上三次預燒條件可見圖(2-5)。

簡單的實驗流程說明：



(2) $\text{Y}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_1\text{O}_{5-\delta}$

A. 配粉：

首先將氧化釔 (Y_2O_3 99.99%)，碳酸鋇 (BaCO_3 99.99%) 和氧化銅 (CuO 99.99%) 三種粉末在電子天秤上依重量比 3.984 : 7.8512 : 3.1647 量取好，使其莫耳數比為 $\text{Y} : \text{Ba} : \text{Cu} = 2 : 1 : 1$ ，混合後在研磨機內研磨，使這三種粉末能夠均勻混合，以利可以完全反應，約 50 分後取出混合均勻之灰色粉末。

B. 預燒（需三次）：

將混合後的均勻之灰色粉末放置在氧化鋁瓷舟 (boat) 中，送進高溫爐內開始加熱預燒，利用微電腦控制升溫流程至 850 °C，持溫 8 小時，爐門關閉自然降溫冷卻後取出。此為第一次預燒。

將第一次預燒後的粉末塊取出，放入研鉢中敲碎，然後以研杵加以研磨成粉末（為了以利在研磨機中之研磨），在倒入研磨機內研磨約 50 分鐘，使粉末均勻。再次放入高溫爐內進行第二次預燒。

將第二次預燒完成的粉末塊取出，將粉末研磨均勻以方便於第三次預燒。其預燒程式同第二次預燒。

將三次預燒完成後的粉末，加以研磨均勻，就是預燒完成的

綠色粉末。以上三次預燒條件同 $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ ，可見圖(2-5)。

簡單的實驗流程說明：

決定 $Y_2Ba_1Cu_1O_{5-\delta}$ 的成分 → 依成分配粉 → 混合均勻 → 進行
第一次預燒(850 °C) → 取出後細磨 → 再次進行第二次預燒
(900 °C) → 再次取出細磨均勻 → 進行第三次預燒(900 °C) →
取出並細磨 → 完成三次預燒之粉末

(3) YBCO123+YBCO211 塊材之製作

秤取適當重量的 $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ 和 $Y_2Ba_1Cu_1O_{5-\delta}$ ，使其莫耳數
比為 60：40（YBCO123：YBCO211，重量為 7.5394：3.4606，
一顆塊材的重量為 11 克，乃經驗值也。），放入研磨鉢中充分混
合均勻（此處不以研磨鉢研磨的原因有二：一是怕因研磨鉢研磨
而損失太多的粉末，造成重量不足；二是容易造成粉末的污染。）
再由實驗室自製之壓模機以 400 kg/cm^2 壓力壓模成直徑 24 mm
的樣品，並將 SmBaCuO 晶種（關於晶種部分，請參考後面之介
紹）置於其上，再把樣品置於氧化鋁瓷舟背面上，送入箱型高溫
爐內進行燒結，微電腦控溫程序條件如圖(2-6)。

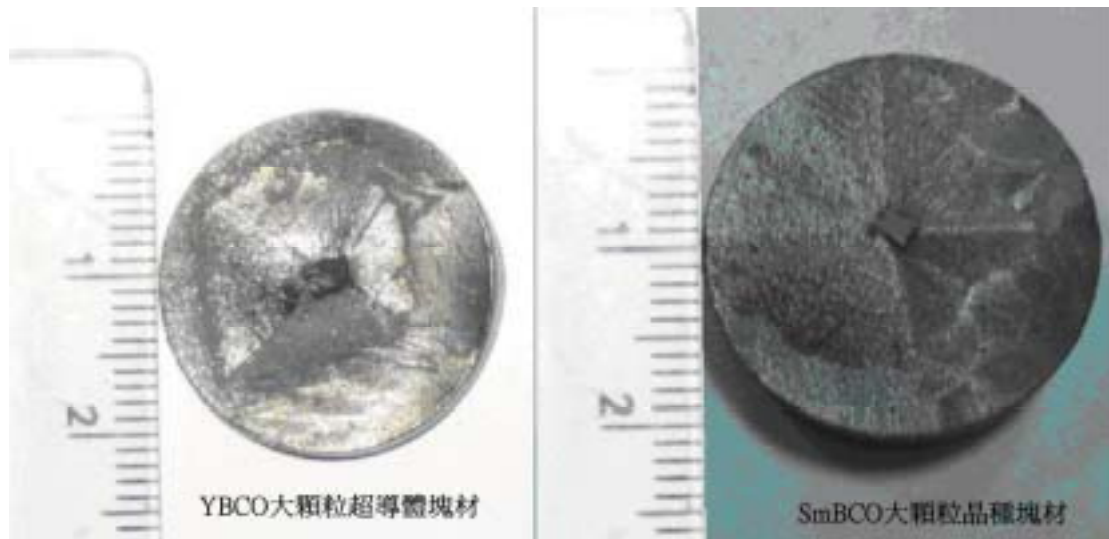
(4) 補氧程序

燒結完成到室溫後取出，因為樣品中的氧氣在 1000 °C 以上

將無法存在，所以燒結完成後，我們要對樣品進行補氧過程，其

補氧程序如圖(2-7)，至此為樣品完成。

以上完整的樣品燒製流程可參考圖(2-8)。



圖(2-1) YBCO 大顆粒超導體塊材、SmBCO 大顆粒晶種塊材

圖(2-2) SmBaCuO123 預燒溫度表

步驟	升降溫速率 (°C / 小時)	目標溫度 (°C)	持溫時間 (小時)
1	360	850	8
2	360	27	End

SmBaCuO123 第一次預燒溫度表

步驟	升降溫速率 (°C / 小時)	目標溫度 (°C)	持溫時間 (小時)
1	360	900	8
2	360	27	End

SmBaCuO123 第二次及第三次預燒溫度表

圖(2-3) SmBaCuO211 預燒溫度表

步驟	升降溫速率 ($^{\circ}\text{C}$ / 小時)	目標溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	持溫時間 (小時)
1	360	870	8
2	360	27	End

SmBaCuO211 第一次預燒溫度表

步驟	升降溫速率 ($^{\circ}\text{C}$ / 小時)	目標溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	持溫時間 (小時)
1	360	930	8
2	360	27	End

SmBaCuO211 第二次及第三次預燒溫度表

圖(2-4) SmBaCuO123 + 211 燒結溫度表

步驟	升降溫速率 (°C / 小時)	目標溫度 (°C)	持溫時間 (小時)
1	100	800	4
2	40	1130	0.5
3	Step	1070	0.5
4	1	980	0
5	360	27	End

圖(2-5) YBCO123+211 燒結溫度表

步驟	升降溫速率 (°C / 小時)	目標溫度 (°C)	持溫時間 (小時)
1	360	850	8
2	360	27	End

YBCO123 和 YBCO211 第一次預燒溫度表

步驟	升降溫速率 (°C / 小時)	目標溫度 (°C)	持溫時間 (小時)
1	360	900	8
2	360	27	End

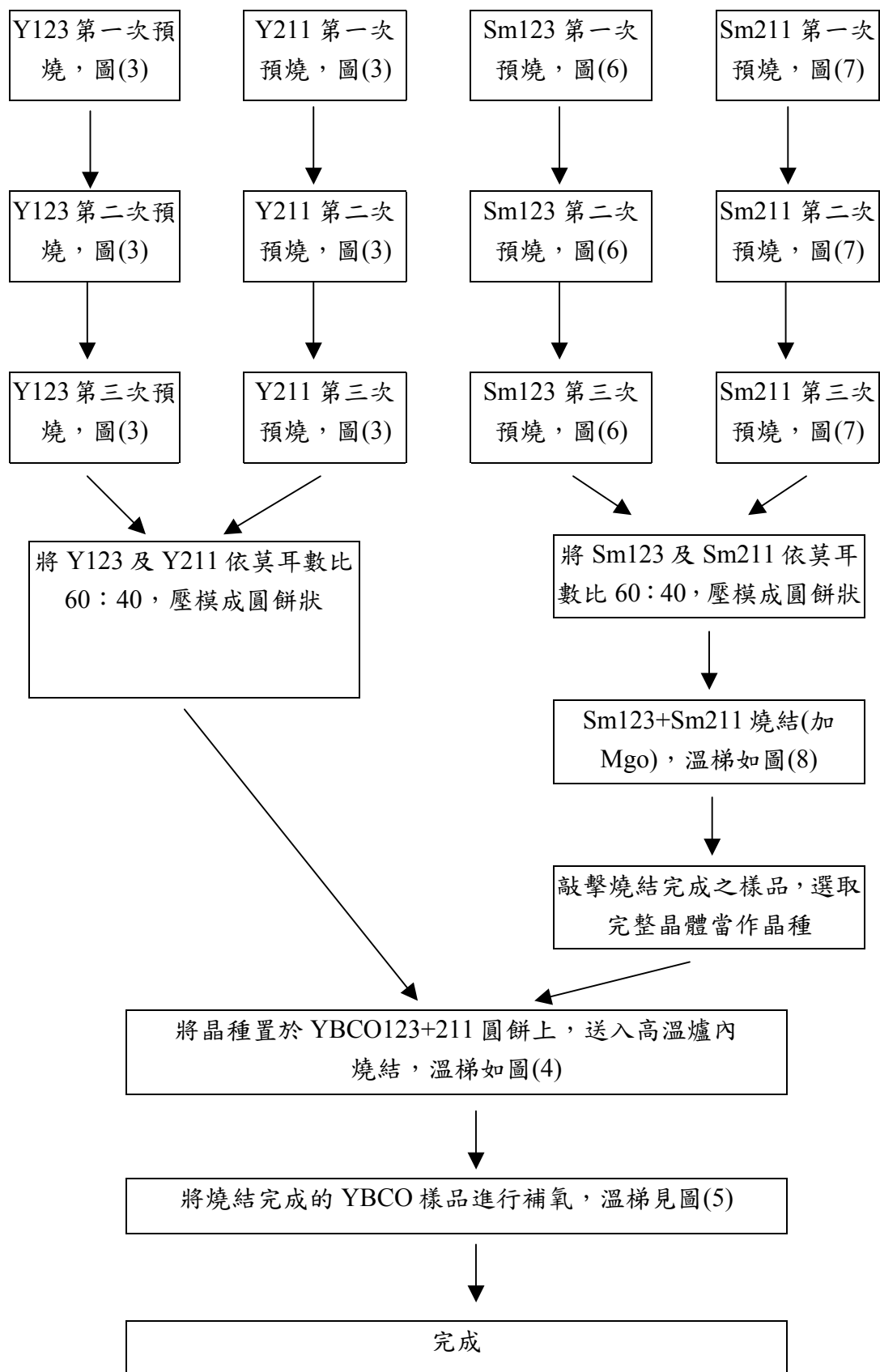
YBCO123 和 YBCO211 第二次及第三次預燒溫度表

圖(2-6) YBCO123 和 YBCO211 預燒溫度表

步驟	升降溫速率 (°C / 小時)	目標溫度 (°C)	持溫時間 (小時)
1	50	800	8
2	50	1045	2
3	Step	1020	3
4	0.5	950	0
5	360	27	End

圖(2-7) YBCO123 + 211 燒結完成補氧溫度表

步驟	升降溫速率 ($^{\circ}\text{C}$ / 小時)	目標溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	持溫時間 (小時)
1	180	300	0
2	90	400	0
3	60	450	1
4	30	490	40
5	150	60	0
6	100	27	End



圖(2-8) 樣品燒製流程

2-4 實驗儀器

2-4.1 製作樣品塊材之裝置

(1) 電子分析天秤

此電子分析天秤為瑞士製造的 METTLER AE 200 型，有效量測位數為 10^{-4} 克，我們用來量測配粉的重量以及燒結完成後樣品的重量。

(2) 研磨機

為德國製 Retsch PX 600 型，主要用來混合製作超導樣品的三種粉末：氧化釔（ Y_2O_3 ）、氧化銅（CuO）及碳酸鋇（ $BaCO_3$ ），使其三種粉末能夠均勻混合以利鍛燒；另外也可設定研磨時間及上方研磨錘下壓之力的大小，可控制研磨後粉末的大小在 $1 \sim 40 \mu m$ 之間。

(3) 壓模機

此為實驗室自製之儀器，最大壓力可達 $1000 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ ，主要用途是用來將混合後的超導粉末壓成塊材，以進行燒結，可製成直徑為 2.5 cm 及 1.26 cm 的兩種圓柱塊材。

(4) 管狀高溫爐

為美製 LINDBERG 54459 A 型，爐管的材質為氧化鋁，主要用來燒結超導樣品；其加熱區可分為三區：接近爐口的

兩端（第一及第三區）分別各由一組控制器和一組熱電偶控制，中間部分（第二區）則另由一組控制器和三條熱電偶操控，經由此三區的配合，可將爐內溫度控制在正負 0.2 度之內，最高溫度可達 1500 度。但因外在因素的不同，爐內溫度有可能與我們設定的溫度不符，所以需要定期以 R 型熱電偶進行校溫的工作。

(5) 箱型高溫爐

為美製 LINDBERG/BUE BF 1333C 型，內部是以高溫磚所砌成的中空高溫爐，加熱時採封閉式，爐內中央有一平台可供放置樣品進行鍛燒，最高溫度可達 1500 度，操作控溫方式與管狀高溫爐相同，同樣也需要定期以熱電偶進行校溫的工作。

(6) 封管通氧裝置(管狀高溫爐)

美製 Lindberg 54459 A 型，爐管的材質為氧化鋁，我們以不鏽鋼管及耐高溫橡皮墊片將氧化鋁管兩端封住，兩端各留有一個小孔，一端可供進氣口連接塑膠管至氧氣瓶通氧，一端可作為排氣口；另外在氧氣瓶上裝有氣閥，用來控制通氧的進氣量及速率。因為外在環境的不同，故我們設定的溫度實際上和高溫爐的溫度可能有所誤差，所以需要定期用

Thermal Couple 作校正的工作。

(7) 低速鑽石切割機

為美製 SOUTH BAY TECHNOLOGY 公司所製之 MODEL 650 型的切割機，刀片是直徑四英吋，厚度為 0.12 英吋之鑽石刀片，可用來切割燒結完成之超導塊材的大小或形狀及所需切割之物件。

(8) 萬用電表

為數位式電表，可用來檢驗高溫爐內的溫度以及量測超導樣品的室溫電阻值。

(9) 實體光學顯微鏡

其接物鏡有二倍和四倍兩種，可用來觀察超導體的表面，以及在需要進行細微的超導體表面加工時使用，如四點接腳或觀察樣品表面的晶面狀況等等。

2-4.2 實驗系統架構之裝置

(1) 氦氖雷射

用來提供非散射光源以利精確量測實驗數據。

(2) 測距顯微鏡

分別至於 X 軸和 Y 軸兩方向，用來準確量測實驗時磁鐵

與樣品之間的距離，以及樣品的 X 和 Y 方向的相關位置。

(3) 轉動馬達及平台

(4) 高斯計

美製 M.I. 7305 型，用以量測永久磁鐵其磁場分布情形，以及磁場大小。

(5) 永久磁鐵

成分為 Nd-Fe-B。

(6) 低溫系統

美國 RMC-Cryosystem 所製，屬封閉式循環系統，由氮氣壓縮機壓縮氮氣至低溫腔內，藉以帶走低溫腔內的熱量，並可由溫度控制器來調節腔內的溫度。

(7) 高敏度數字型伏特計

美製 KEITHLEY Model 1482 型，其最低電壓可讀至 $0.1 \mu\text{V}$ 。

(8) 可調式電流源

美製 KEITHLEY Model 220 型，其可輸出最低電流為 1 nA 。

(9) 抽真空機

可將低溫系統之低溫腔內的空氣抽走，可至 10^{-3} Torr 。

2-5 樣品所使用的相關粉末

(1) Sm_2O_3

SDIC 代理，Purity：99.99 %，Size：-325 mesh。

(2) Y_2O_3

鑫拓公司代理，Purity：99.99 %，Size：Dia 3 μm 。

(3) CuO

鑫拓公司代理，Purity：99.999 %，Size：under 10 μm 。

(4) BaCO_3

鑫拓公司代理，Purity：99.95 %，Size：-325 mesh。

(5) CeO_2

偉斯公司代理，99.99 %。

(6) Ag_2O

偉斯公司代理，99.5 % pure，Size：-80 mesh。

第三章 實驗方法與步驟

3-1 實驗方法與系統架構

本實驗將 YBCO 超導體薄片，置放於低溫系統內。我們在樣品上方裝置可變式磁場，及在環境周圍加裝可調式電流源，控溫裝置，電壓與電流讀表，並用 GPIB 介面卡控制儀器。見附圖(4-1)所示，我們可以清楚的瞭解整個系統的架構。

3-1.1 真空低溫系統架構

實驗所需的低溫是利用封閉式氦氣循環系統，由壓縮機壓縮氦氣至低溫腔內，藉以帶走低溫腔內的熱量，並安裝加熱棒於鋁座內調節溫度，我們可由溫度控制器來判斷腔內的溫度。見附圖(3-1)A・真空低溫系統架構圖。

3-1.2 樣品薄片的製作與放置

實驗所需的樣品薄片是採用 YBCO123+211 混和壓模，並用 SmBaCuO 單晶為晶種燒製而成的大晶面 YBCO 塊材。將樣品用砂紙磨薄，再用低速鑽石切割機切片。而我們採用樣品的大小為，長 8.9 mm、寬 3.8 mm、厚 1.38 mm。最後利用鈦及金線加工接成四點接腳。見附圖(3-2)。

我們將樣品放置於樣品座上，在樣品座與下方降溫傳導柱的接觸面填充鈳，因為鈳的延展性和傳導性良好，所以可以加強平衡溫度的效果。而樣品與樣品座的接觸面是利用雙面膠與低溫膠填充。其目的是確保樣品與樣品座絕緣且保持溫度穩定。附圖(3-3)。

順帶一提的是：樣品座原本使用銅柱為材料，且樣品座本來為一平面，但是在測試時發現了銅在低溫下也會產生很大的感應電流，使馬達轉速無法加快，所以將銅柱改為鋁柱，並且將樣品放置的平面向上提高，以減少鋁柱面的干擾。

3-1.3 可變頻磁場

如附圖(3-3)所示，實驗中為了外加變動的磁場，以改變磁通子的變化，我們利用直流馬達帶動兩個永久磁鐵旋轉，兩個永久磁鐵中分別由 S 和 N 不同的面連接。此外我們使用電池提供直流電源，並利用精密式可調電阻控制馬達的電流大小，以改變馬達的轉速。

而馬達轉速的判定，是利用雷射穿過馬達中心的下方，穿過的高度介於磁鐵高度之間，後方使用接收器連接訊號放大器接收雷射。其原理是當馬達旋轉時，因雷射的高度介於磁鐵高度之間，磁鐵旋轉時會擋住雷射，接收器對雷射的接收因而產生時間差，

而使放大器連接在示波器上的訊號波形產生近似方形的脈波，再經由鎖相放大器即可讀取馬達轉速。以上可見附圖(3-1)B・控制系統架構圖。

3-1.4 程式控制

系統的硬體方面，我們在電腦上加裝 GPIB 介面卡控制儀器；使用 GPIB 介面卡控制的儀器有溫控器、伏特計和電流源。軟體方面是使用 Turbo Basic 程式語言編寫，再將 GPIB 的程式編譯在一起成為一個執行檔。

3-1.5 讀取數據

本實驗是在不同轉速的外加磁場下測量樣品的感應電壓的大小，

我們利用鎖相放大器，讀出馬達的轉速，也利用示波器直接看到感應電壓的變化。見附圖(3-1)C・量測系統架構圖。

鎖相放大器可以過濾出雜訊中的微弱訊號，以下簡介其原理：

雜訊看起來很亂，沒有規律，但是對於雜訊來說，雜訊具有平坦的頻譜；即在寬闊的頻率範圍內，雜訊具有幾乎相同的訊號，且我們所測量到的訊號約為雜訊頻譜寬度的開根號，若我們將欲測量的頻寬縮小到百分之一，則雜訊也減少為十分之一。而一般我們所要測量的訊號，舉正弦波為例子：正弦波的頻譜非常的集

中，即 50 Hz 正弦波信號的頻譜，只存在於 50 Hz 的位置，其他地方的頻譜的訊號都為零。所以我們測量到的正弦波訊號與頻譜寬度無關，所以任意包含到正弦波頻率的頻寬都可測量到正確的電壓值。

所以若我們將頻寬鎖定在欲測量訊號的頻寬上，再將頻寬幾乎縮小到只包含到欲測量訊號的頻率時，雜訊的干擾也會被減到最小，而鎖相放大器又具有可以追蹤訊號頻率變化的功能。所以常被用來做各種物理量的測量。

所以我們先利用鎖相放大器讀出馬達轉速，鎖相放大器再根據此轉速的大小及變化讀出 YBCO 薄片的感應電壓大小。我們還可以更改 Time constant 以便我們讀出各種時間下的平均電壓值。鎖相的儀表板面見附圖(3-4)。

3-2 實驗流程與步驟

3-2.1 加磁場後，磁場影響的臨界溫度

首先要測量的是在 YBCO 薄片上方加磁場後，磁場是否影響臨界溫度。我們在電腦上加裝 GPIB 介面卡控制儀器，控制的儀器有溫控器、伏特計和電流源。如附圖(3-1)D・測量 T_c 架構圖。

在測量 T_c 時溫度計與樣品的距離會造成臨界溫度的誤差，溫度計距離樣品越近讀到的溫度越準。在真空下，導線是熱傳導的

最佳路徑，如果都能一起降溫，就可以把整個環境的熱都帶走，可以減少很多雜訊的誤差；而在測量電阻時所使用的電流大小也會造成些許的誤差，一般來說所使用的電流越小，雜訊越多。不過要注意的是所加的電流不可超過臨界電流。

此流程的操作步驟見附圖(3-5)。

3-2.2 轉動磁場引起的感應電壓變化

接著觀察轉動磁場引起的的感應電壓變化。利用直流馬達帶動一對 N、S 極的磁鐵旋轉，磁鐵大小為：長 10 mm、寬 8.1 mm、高 4.9 mm。而磁鐵距樣品上方約 3.83 mm，樣品所受到的磁場大小，用高斯計測量出約為 3000 Gauss。磁鐵在馬達的帶動下，產生變動的磁場，如此我們可以觀察超導體中，磁通子移動所引起的感應電壓之變化。

架設系統如附圖(3-1)A、B、C 的架構圖。

轉動馬達時，有時因低溫或靜摩擦力的關係，一時無法將馬達啟動，這時可以將可變電阻快速轉小再轉回來，利用瞬間變大的電流驅動馬達。而接收器接收雷射光時儘量讓雷射光打在中心點，且觀察示波器一，進而調整雷射光的左右高低。通常雷射光太低則示波器一的波形振幅較小，反之則較大；若高過磁鐵則出現許多不規則雜訊。而雷射光偏左或偏右，則可由方波的波峰及

波谷的比例判定。

鎖相方面必須調整好 Time constant & Sensitivity，如此可配合在示波器二的 Volt & Time 的設定，如此可得到較好的波形。本實驗測量瞬時電流所採用的 Time constant 為 $300\ \mu\text{s}$ 、Sensitivity 為 5 mV 或 1 mV 而示波器的 Volt & Time 分別為 1 Volt 或 2 Volt & 5 ms。

此流程的操作步驟見附圖(3-6)。

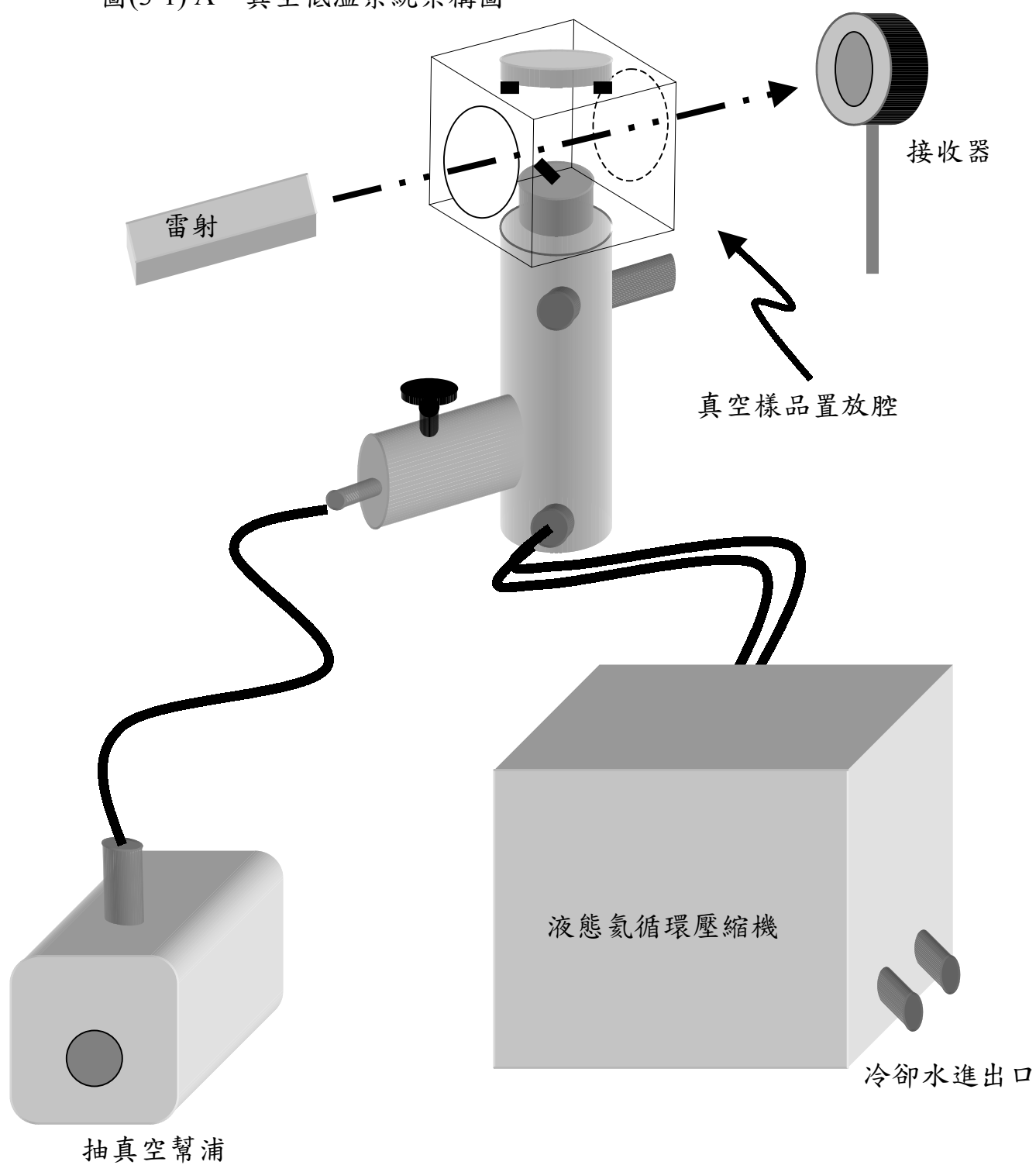
3-2.3 在不同頻率的轉動磁場下，加電流引起的感應電壓變化

利用微調的可變電阻，可控制馬達的旋轉速率，再利用雷射及訊號放大器可讀取馬達轉速。再觀察轉速變化對感應電壓的影響。馬達轉速的頻率，選擇 30 Hz、40 Hz 及 50 Hz 三種，再利用直流電源供應器外加 0 ~ 100 mA 的電流通過樣品，在不同溫度下測量 YBCO 薄片的感應電壓變化。

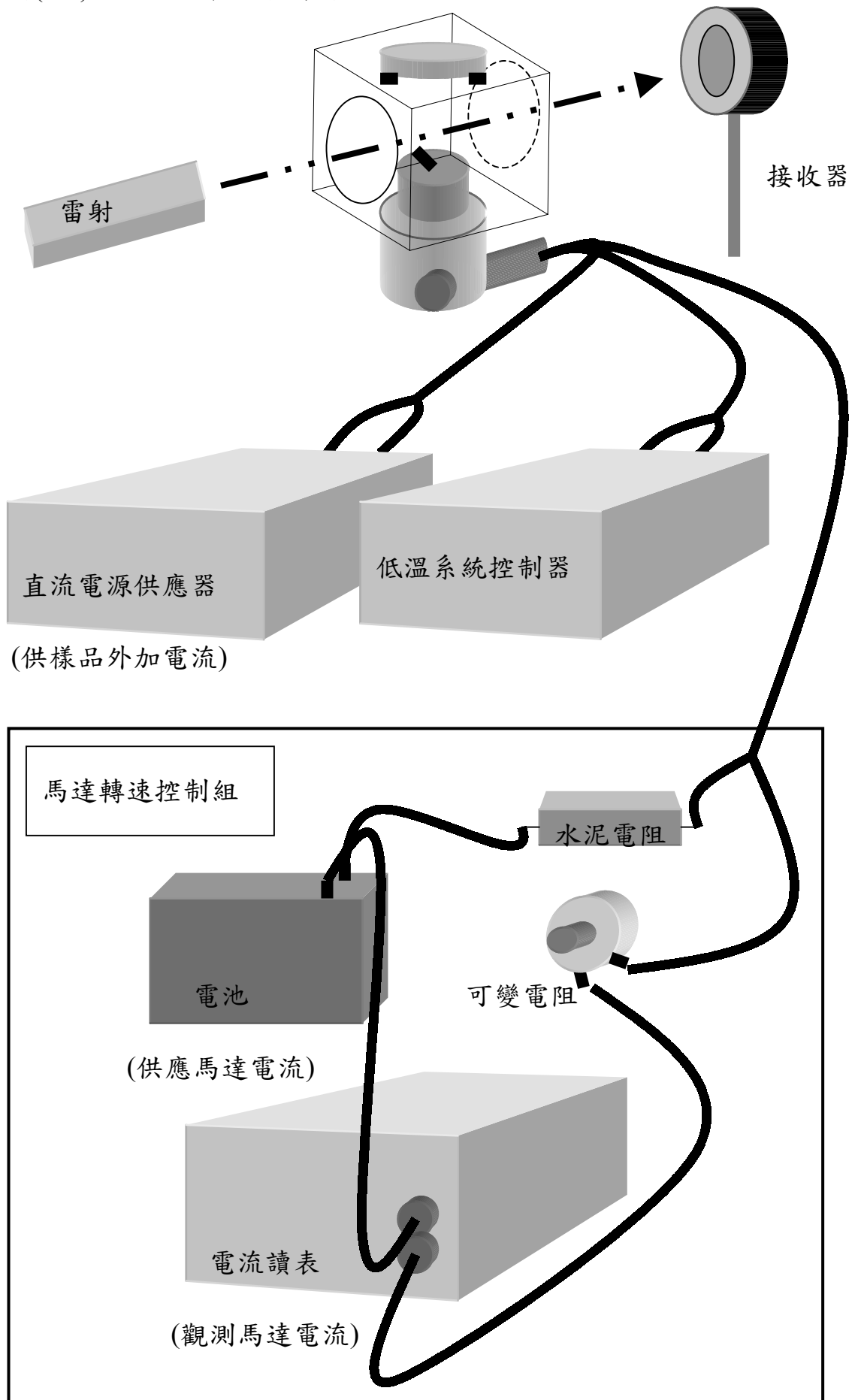
架設儀器如附圖(3-1)A、B、C 的架構圖。

此流程的操作步驟見附圖(3-7)。

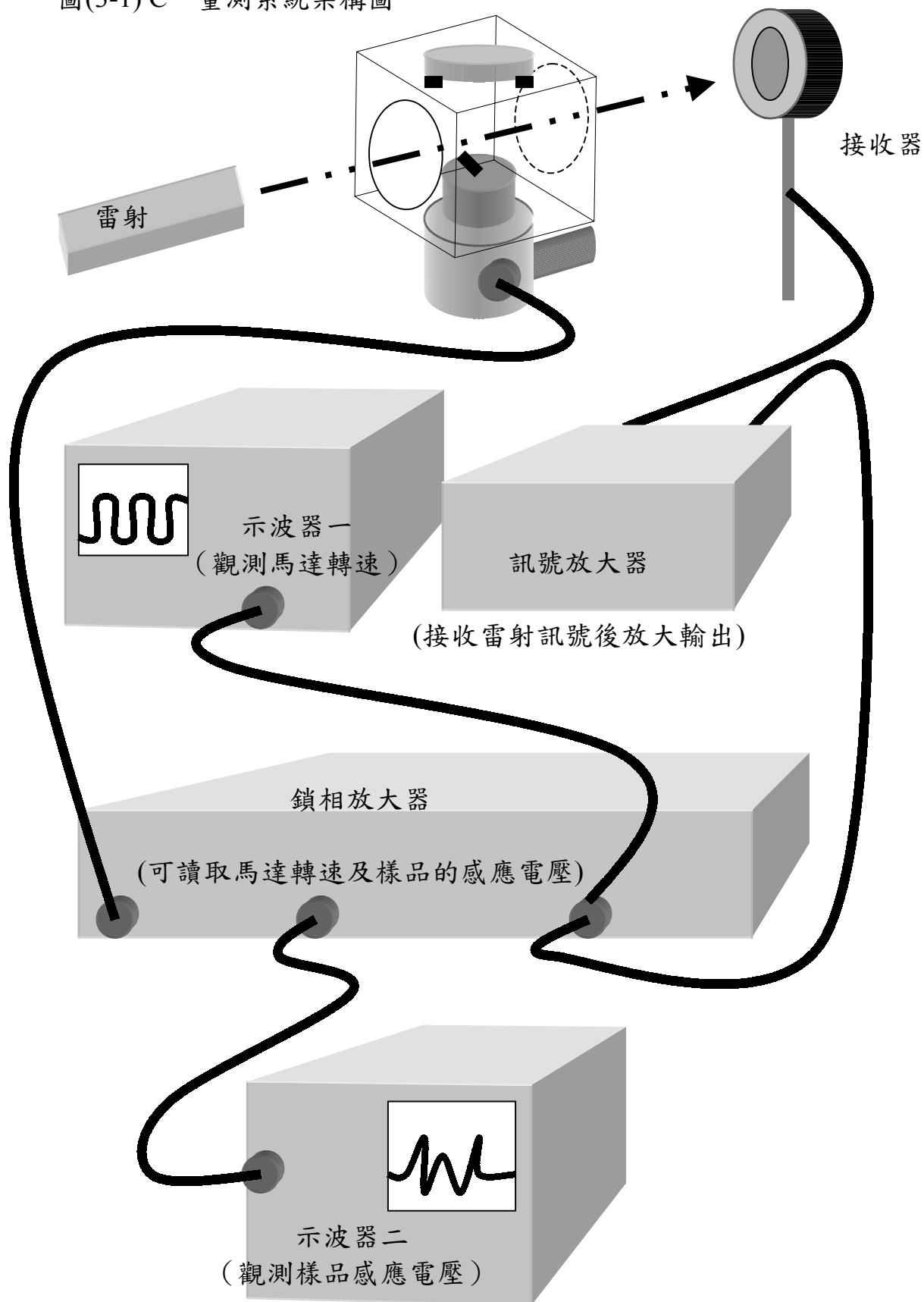
圖(3-1) A 真空低溫系統架構圖



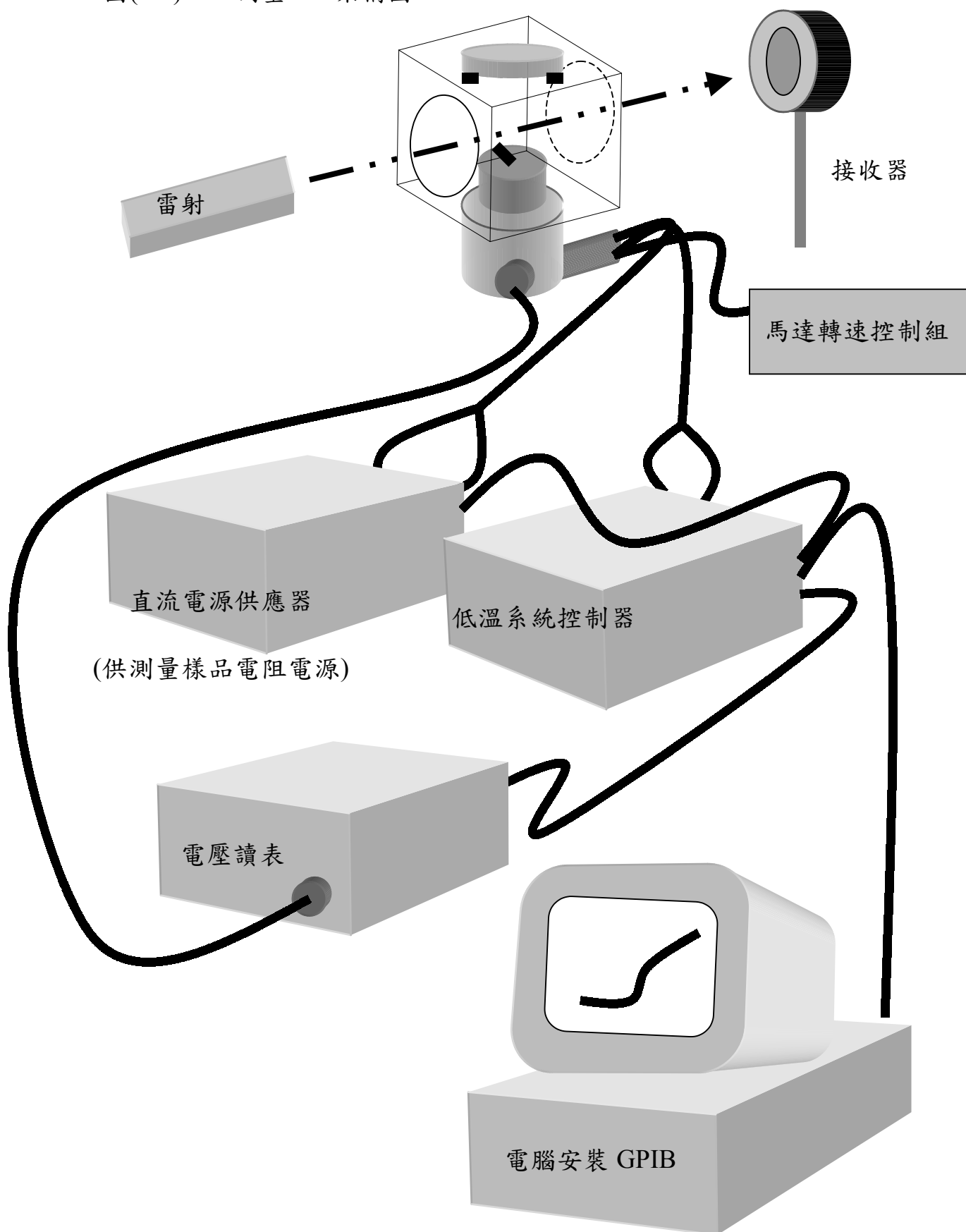
圖(3-1) B 控制系統架構圖



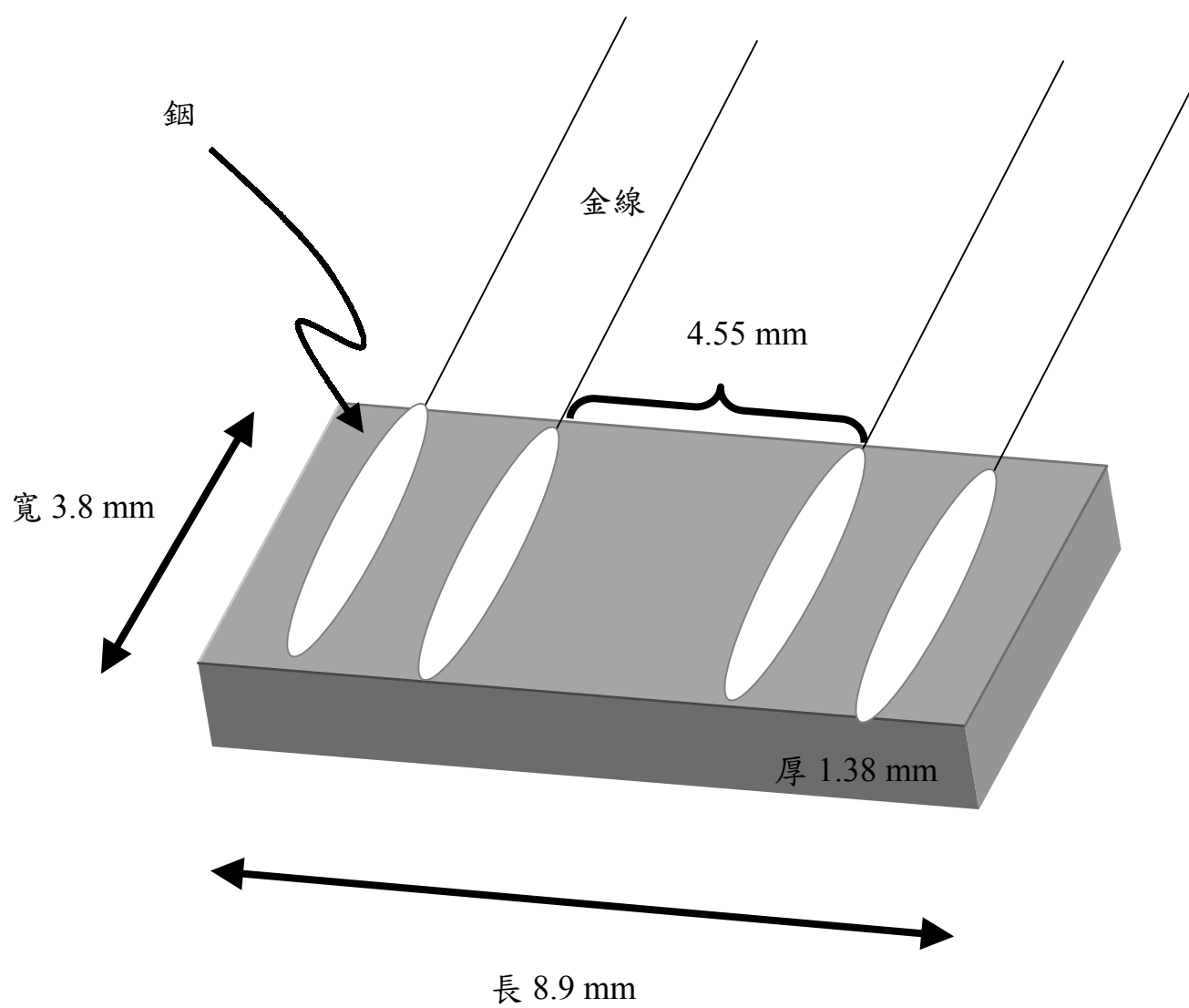
圖(3-1) C 量測系統架構圖



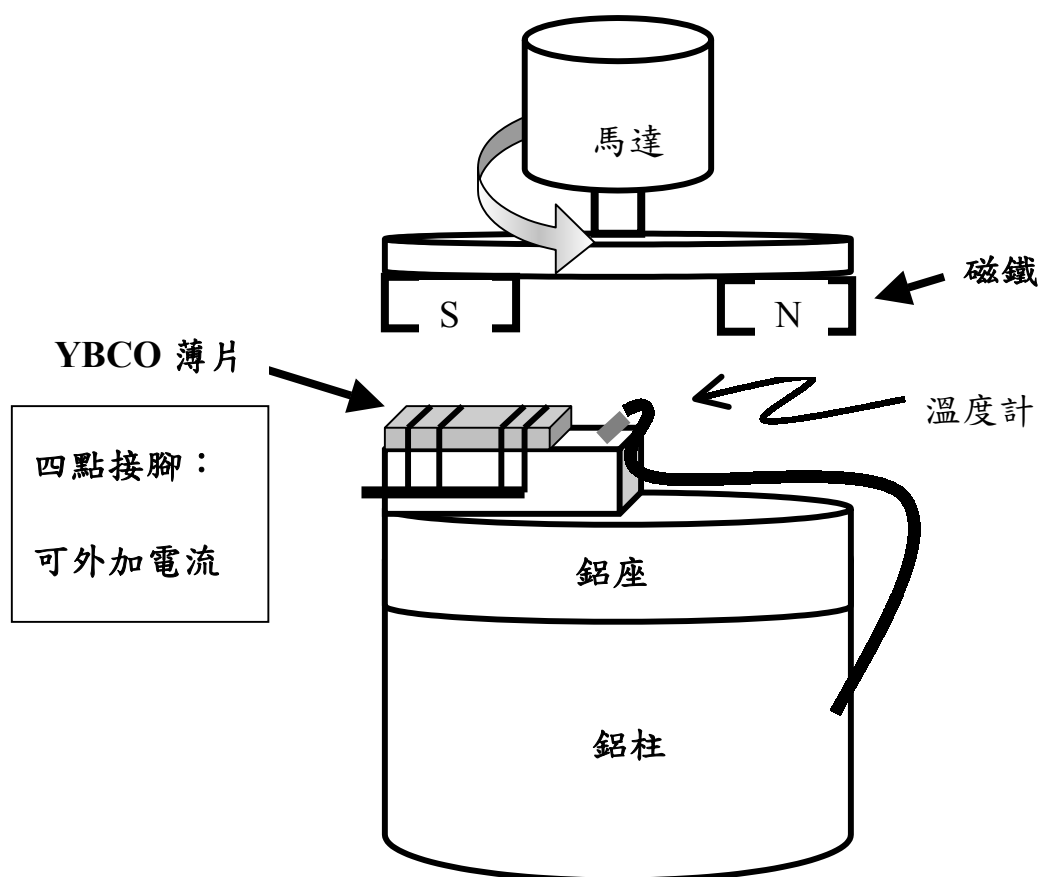
圖(3-1) D 測量 T_c 架構圖



圖(3-2) 樣品四點接腳圖

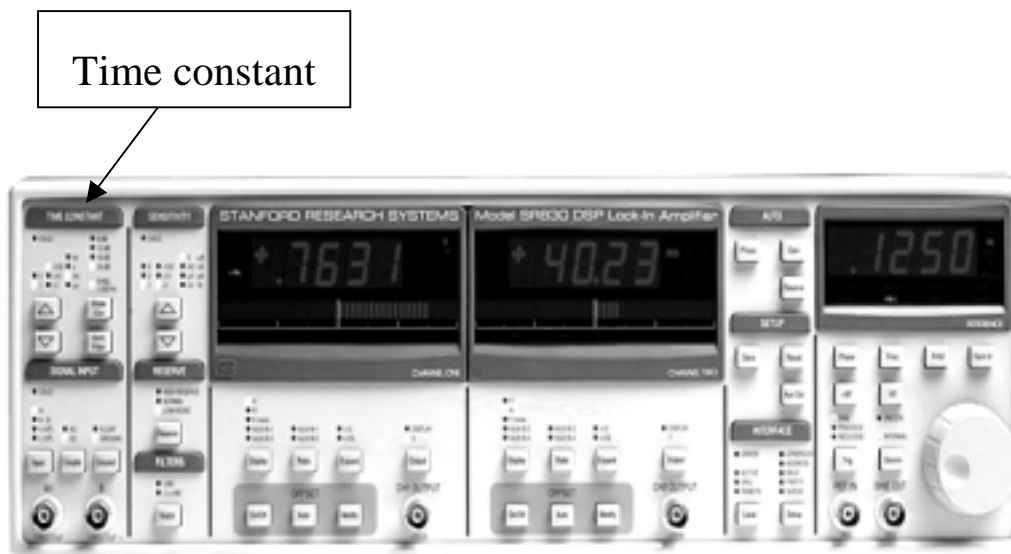


圖(3-3) 樣品座裝置圖

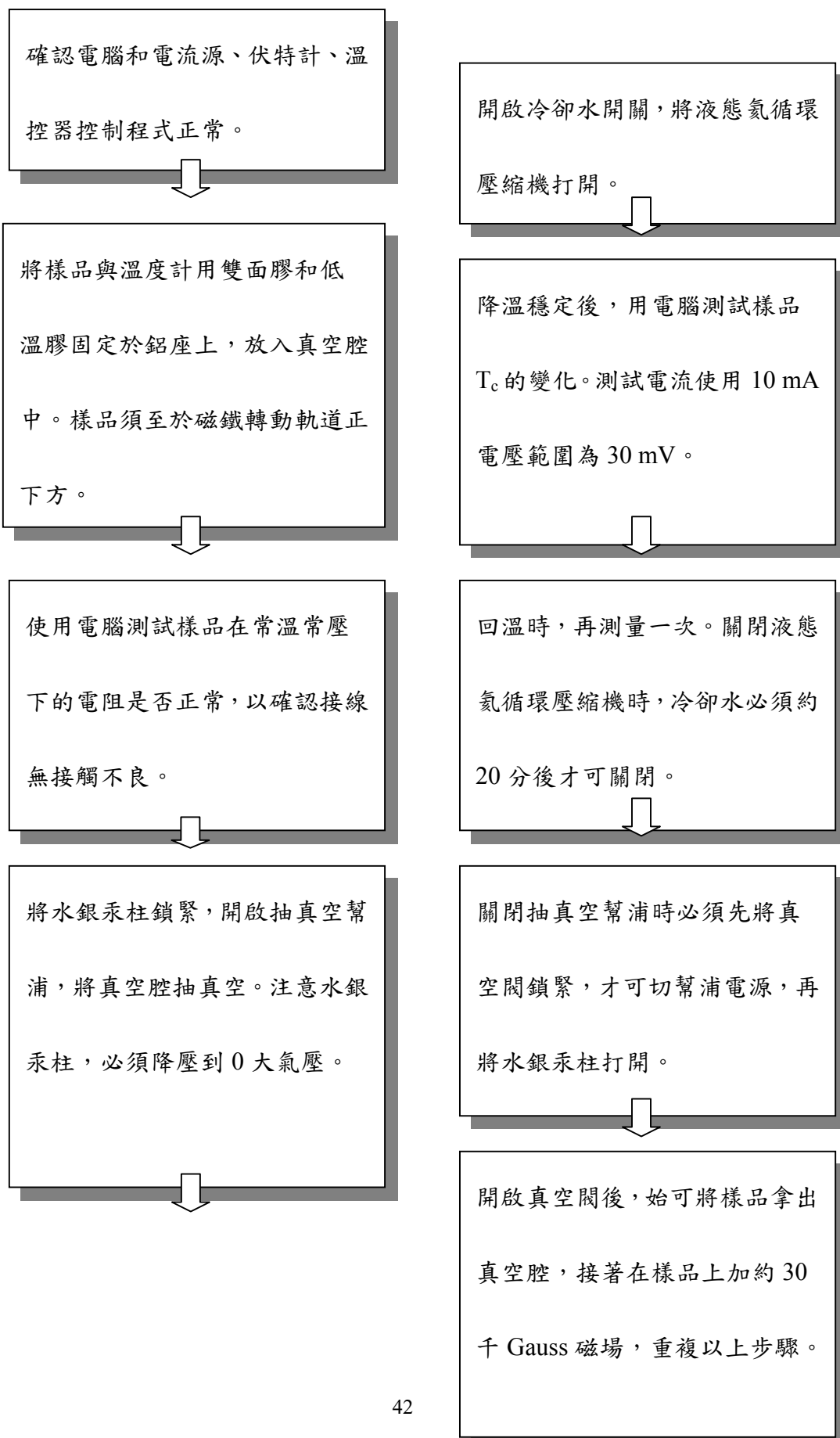


我們將樣品置於鋁座上，然後利用馬達帶動磁鐵旋轉。磁鐵的 S、N 極分別朝下。磁鐵的大小為：長 10 mm、寬 8.1 mm、高 4.9 mm。磁鐵面到樣品表面的距離為：3.83 mm。樣品面受到的磁場大小為三千高斯。鋁座與鋁柱的接面填充銅，而位於鋁座底部的是液態氦循環低溫系統。此圖環境位於真空狀態。

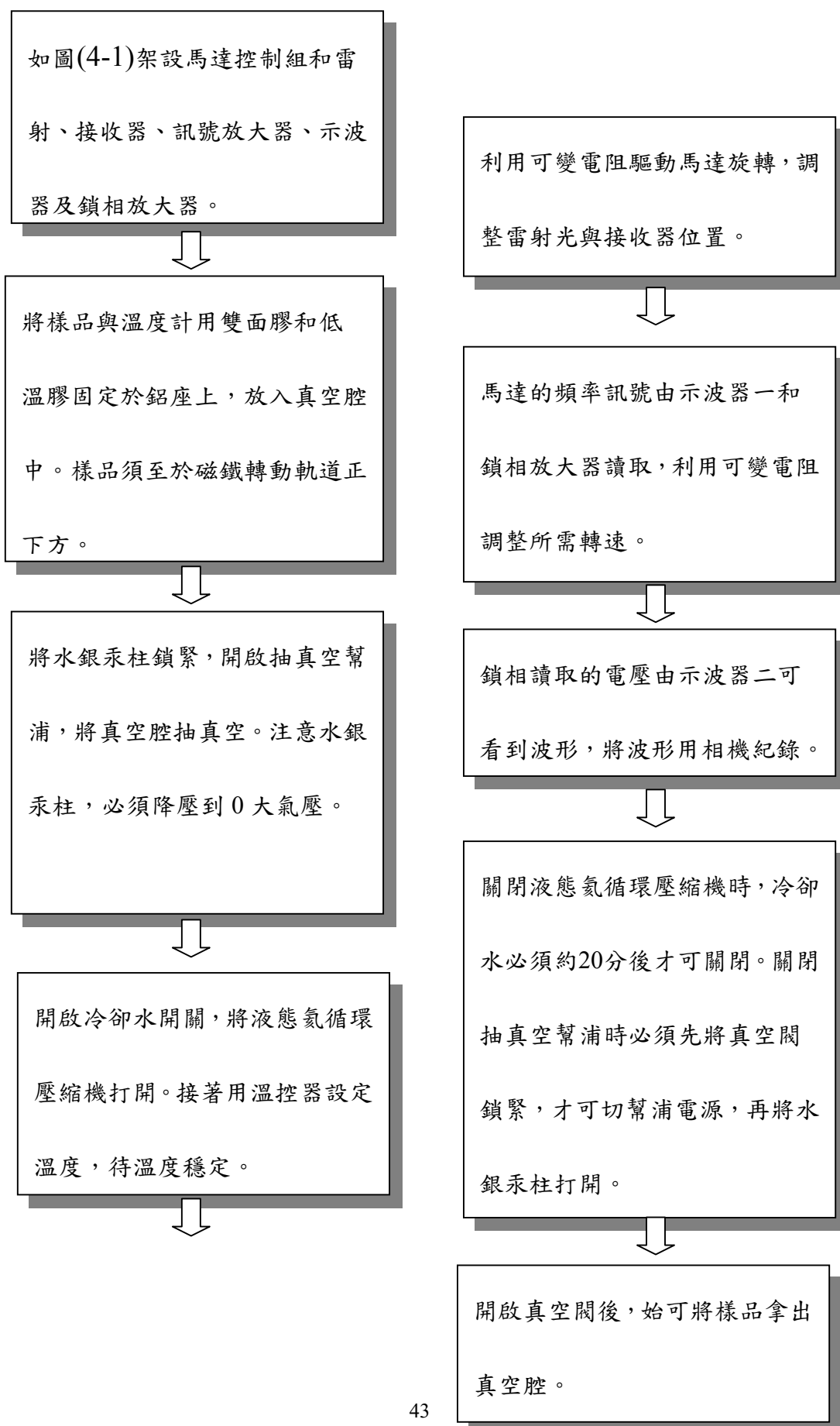
圖(3-4) 鎖相放大器之操作面板



圖(3-5) 測量臨界溫度操作步驟



圖(3-6) 測量磁場引起的感應電壓變化的操作步驟



圖(3-7) 不同頻率磁場下，測量加電流的感應電壓的操作步驟



第四章 結果與討論

4-1 加磁場臨界溫度變化的數據分析

實驗結果如附圖(4-1)。

由圖(4-1)中，我們可確定：樣品的臨界溫度約在 92 K ~ 92.5 K 附近，而加了 3 千高斯的磁場後，可以發現臨界溫度 90.5 K ~ 91 K 附近，約下降了 1 K，且轉變為超導態的溫區的線段斜率變小，也就是這一段轉變為超導態的溫區變大。可印證之前所說的磁場會阻礙超導對的形成，使得超導體的轉換溫度朝低溫區偏移。

此實驗結果可提供我們在測量時判定 YBCO 超導體是否已到達超導態，或是正在轉換溫區。而此後的實驗我們將會針對超導態轉換溫區做近一步的測量與探討。

實驗中的誤差來源：溫度計和樣品在安裝時與鋁座之間的接觸面是否良好；當樣品接觸好，溫度計沒黏好時，所測得的臨界溫度較高，反之當樣品接觸不好，所測得的臨界溫度較低。於是，在裝樣品時塗上一層薄薄的低溫膠，以求填補接觸面間的縫隙。另外，測量樣品電阻時的直流電源使用 10 mA，讀取樣品電阻時可減少雜訊。

4-2 觀察與分析轉動磁場與感應電壓

實驗結果如附圖(4-2)~圖(4-14)；由以上各圖中，我們發現：

1.在實驗時，示波器上可看到如牛角般一左一右，近似對稱的波形。

由於實驗是使用直流馬達帶動兩個永久磁鐵旋轉，兩個永久磁鐵中分別由 S 和 N 不同的面連接。所以推測如下：當馬達旋轉時，分別讓兩個 S、N 面的磁場依序進入超導體的垂直面，由法拉第定律可知，當線圈內上的磁通量產生變化時，會在線圈產生感應電動勢。所以當 S 極的磁場開始進入樣品垂直面的上方，磁場是由下向上穿透樣品的方式進入，於是在樣品上產生了一個圓形電流，又由冷次定律，推出此圓形電流的方向為逆時鐘；而 S 極的磁場離開的時候，則會在樣品上產生一順時鐘的圓形電流；相反的當 N 極的磁場開始進入樣品垂直面的上方時，磁場是由上向下穿透樣品的方式進入，於是在樣品上產生了一個順時鐘的圓形電流，離開的時候，則會產生一逆時鐘的圓形電流。

以上推理繪製輔助解說圖(4-15)。

一逆一順的圓形電流也造成示波器上看到的一正一負的電動勢；而 S、N 極的磁場依序的進入與離開樣品表面上方，也就造成了現在所看的示波器上如牛角般一左一右，近似對稱的波形。

2.當馬達的轉速越慢，則波形也越寬。

在實驗中，如圖(4-2)，295 K 時，不同頻率下 YBCO 的感應電壓訊號。其中第一張圖，鎖相放大器所用的 Time constant 為 300 μ s，而 Sensitivity 為 5 mV；而示波器的 Volt 為 2 Volt，而 Time 為 5 ms。於是我們可推算出此波形的週期為 $3.9 \times 5 \text{ ms} = 0.0195 \text{ s}$ ，可推知馬達轉速為 51.3 Hz，相當接近於所讀取的馬達轉速 50 Hz。

而第二張圖，亦可算出此波週期為 $5 \times 5 \text{ ms} = 0.025 \text{ s}$ ，可推知馬達轉速為 40 Hz，吻合所讀取的馬達轉速 40 Hz。

這裡所取的週期，見附圖(4-2)的兩張圖，取自圖中的 A 點到 B 點。取法是依據當第一塊磁鐵開始進入樣品面後，到第二塊磁鐵開始進入樣品面之前；由圖中可以判別當第一塊磁鐵進入樣品後，才開始有電壓的變化產生，一直到第二塊磁鐵進入樣品前，為一週期。此頻率為訊號放大器實際所接收到雷射的訊號，也是實驗所採用的頻率。

實際上，由於我們是使用雷射穿過馬達中心的下方，利用馬達旋轉時，因雷射介於磁鐵高度之間，磁鐵旋轉時會擋住雷射光，接收器對雷射光的接收因而產生時間差，再經由放大器讀取馬達轉速。由於同一顆磁鐵轉一圈會阻擋雷射光兩次，故馬達實際的

轉速頻率應為二分之一。

3.當溫度介於超導轉換溫區時，發現波形振幅變大，且不對稱。

如附圖(4-16) 50 Hz 時，不同溫度下 YBCO 的感應電壓訊號。

附圖(4-17) 40 Hz 時，不同溫度下 YBCO 的感應電壓訊號。

附圖(4-18) 30 Hz 時，不同溫度下 YBCO 的感應電壓訊號。

感應電壓訊號，在轉換溫區時，發現波形的振幅變大，代表當時的電壓有增大的現象。推測是因為超導所引起的現象。所以想測量背景訊號。所以使用電熱絲取代樣品，再做一次相同的測試，以求得比較與背景。電熱絲的設計與樣品一樣，使上方的垂直面積皆為相同。

比較樣品與電熱絲的結果，發現電熱絲的波形亦有牛角般的一正一負，只是振幅小了很多，如此約可以看到電熱絲取代樣品後的背景情形。根據計算應取電熱絲圖上的 A、B 兩點為週期，如此可求得對應的馬達轉速。鎖相放大器所用的 Time constant 為 $300\ \mu\text{s}$ ，而 Sensitive 為 5 mV；而示波器的 Volt 為 1 Volt，而 Time 為 5 ms。於是我們可推算出此波形的週期為 $4 \times 5\ \text{ms} = 0.02\ \text{s}$ ，可推知馬達轉速頻率為 50 Hz，相當馬達轉速 50 Hz。如附圖(4-19)。

各溫度下，電熱絲測量結果如附圖(4-20)～圖(4-22)。

4-3 觀察加電流通過樣品所引起的感應電壓變化

結果如：附圖(4-23)~圖(4-27) 溫度與 YBCO 感應電壓的關係圖

圖(4-28) 轉換溫區：溫度與 YBCO 感應電壓的關係圖

圖(4-29) 轉換溫區：YBCO 外加電流與感應電壓的關係圖

我們利用鎖相放大器，將 Time constant 調為 1s，目的在獲取樣品的感應電壓變化。首先在實驗中發現隨著溫度的降低馬達的轉速也越來越慢。每降到一個溫度之後，就必須從新調整一次可變電阻，讓馬達恢復我們所需的轉速，進而也發現馬達轉速的變動對樣品的感應電壓大小也有不同的誤差。所以先做了不同溫度下，不同馬達轉速下，溫度與感應電壓的關係。發現轉速越大，也就是磁場變動越快，的確也引起了較大的感應電流。附圖(4-23)～圖(4-27)。

當把外加電流加大，再通過樣品時，發現在臨界溫度附近感應電壓有明顯的增大，當樣品的外加電流增加到 100 mA 的時候，臨界溫度附近（88 K～94 K）的感應電壓甚至比其他溫度樣品產生的感應電壓大了兩倍以上。圖(4-27)。

所以接下來，就針對了 88～94 這 7 個溫度再做一次測量，發

現在超導轉變溫區的中心位置(91 K)，有最大的感應電壓變化。

而感應電壓，隨著離開臨界轉換溫度的中心而降低。圖(4-28)。

根據以上整理出圖(4-29)，YBCO 外加電流與感應電壓的關係圖。

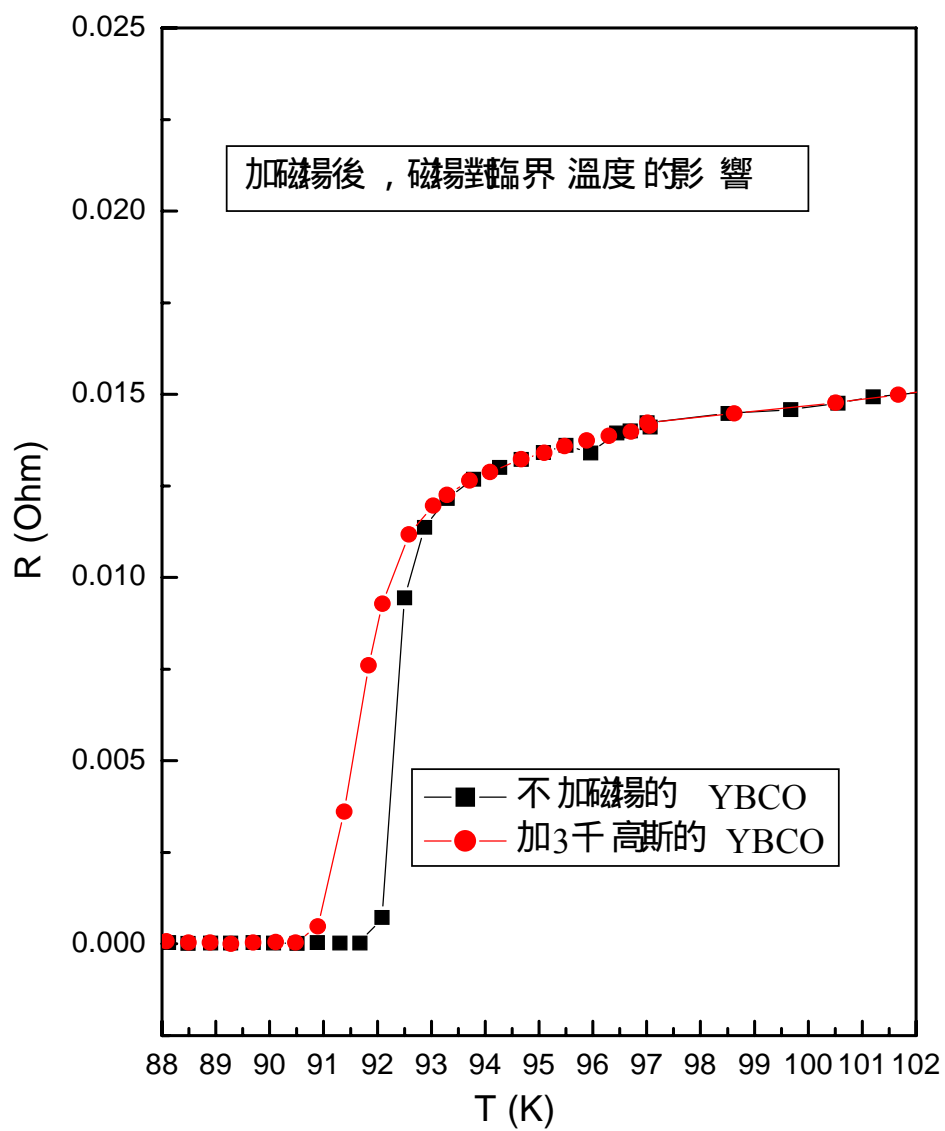
關於此現象的產生：在正常態時，推測是因為磁場轉動，由法拉第定律推知，樣品上會引起的感應電壓訊號。

而在超導轉變溫區時，由於 YBCO 為非理想第二類超導，所以有磁通釘扎中心的產生，而產生的磁通子也正在移動，感應電流會增加磁通子移動的速度，而外加電流之後，對磁通子運動的影響也更加明顯，所以導致樣品的電阻增大，相對的造成感應電壓升高。

完全超導態之後，因為釘扎力的增加，導致磁通子的運動突然消失，所以電阻減小，電壓也減小。也就造成我們現在所觀察到的圖形。

而電熱絲的部分也將測得的數據繪製成圖(4-30)。發現各種情形下，其感應電流幾乎都無明顯的變化。對本實驗來說，背景的誤差並不會造成太大的影響。

圖(4-1) 加磁場後，磁場對臨界溫度的影響

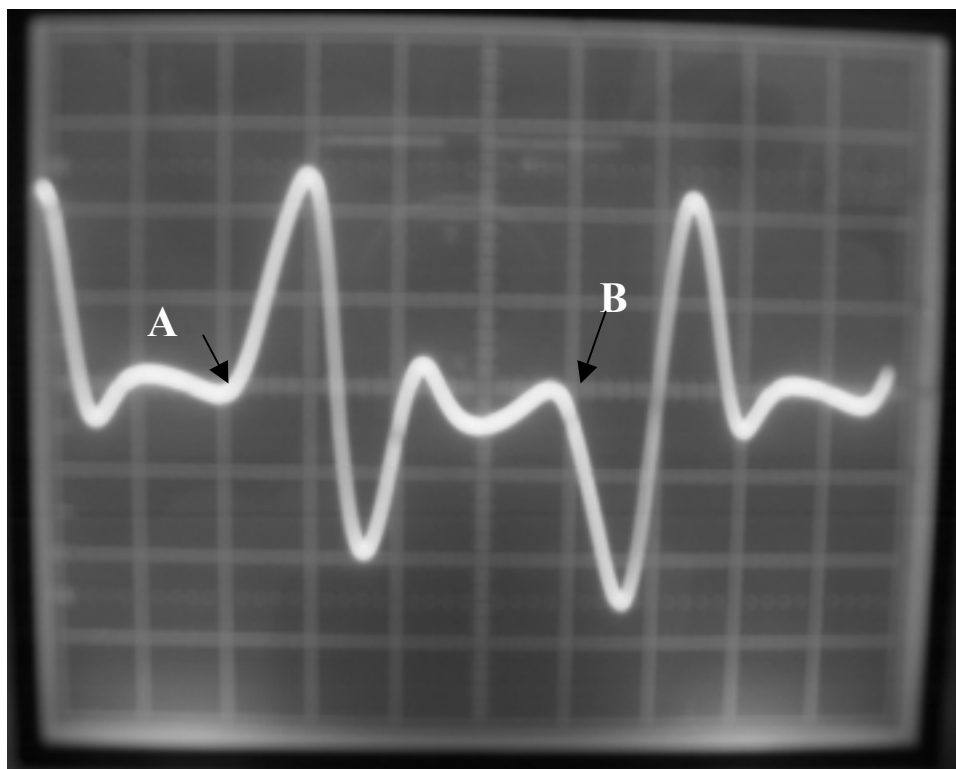


圖(4-2) 295 K 時，不同頻率下 YBCO 的感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、 Sensitivity : 5 mV 、 Phase : 74.86 $^{\circ}$

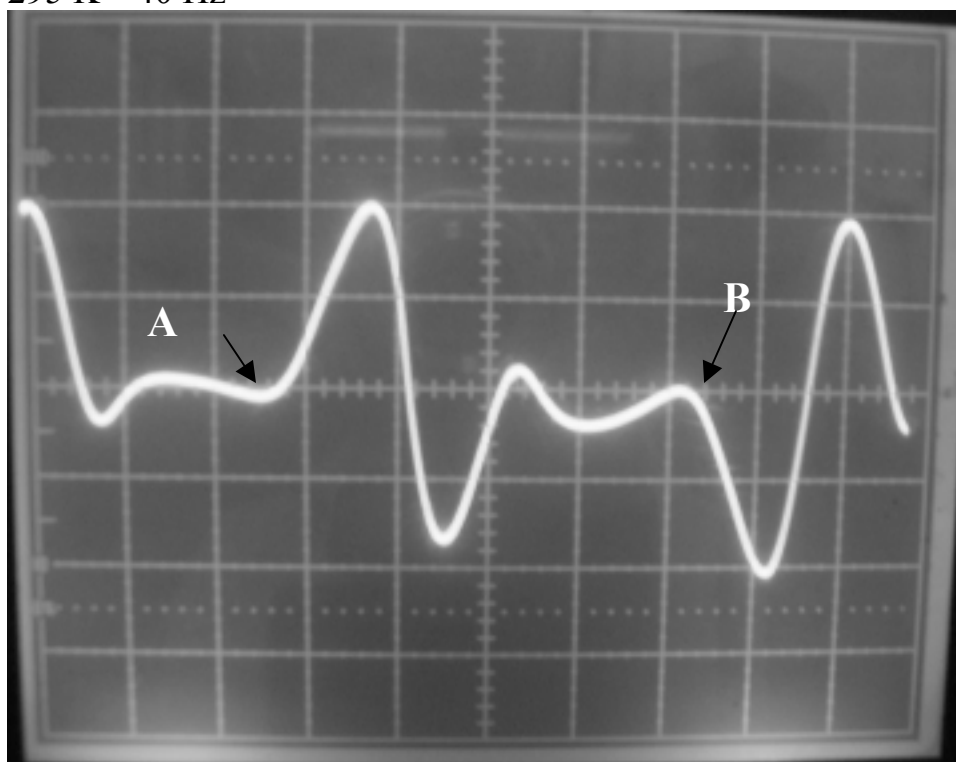
示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms

295 K , 50 Hz



+0mA

295 K 40 Hz

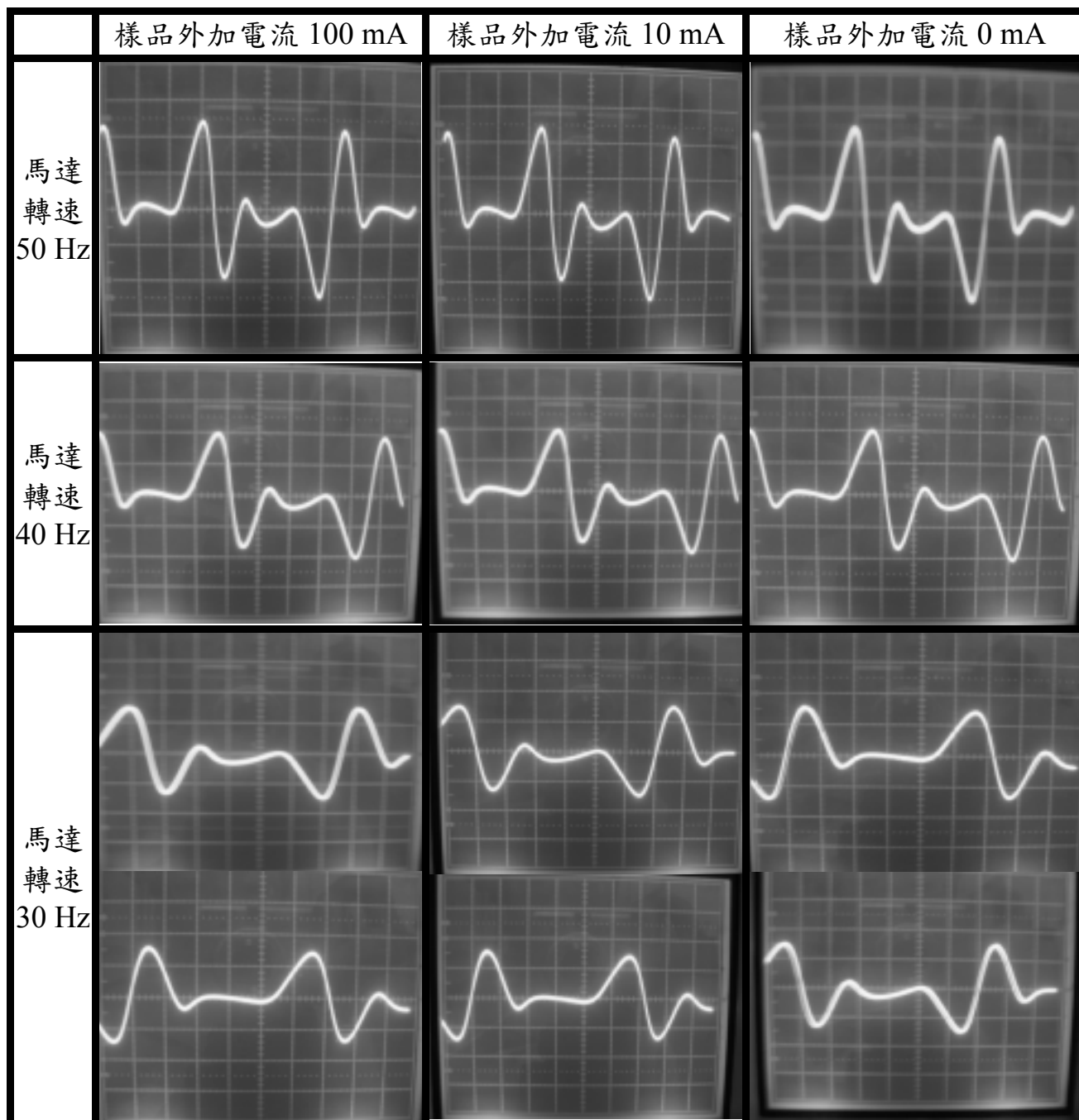


+0mA

圖(4-3) 295 K 樣品感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

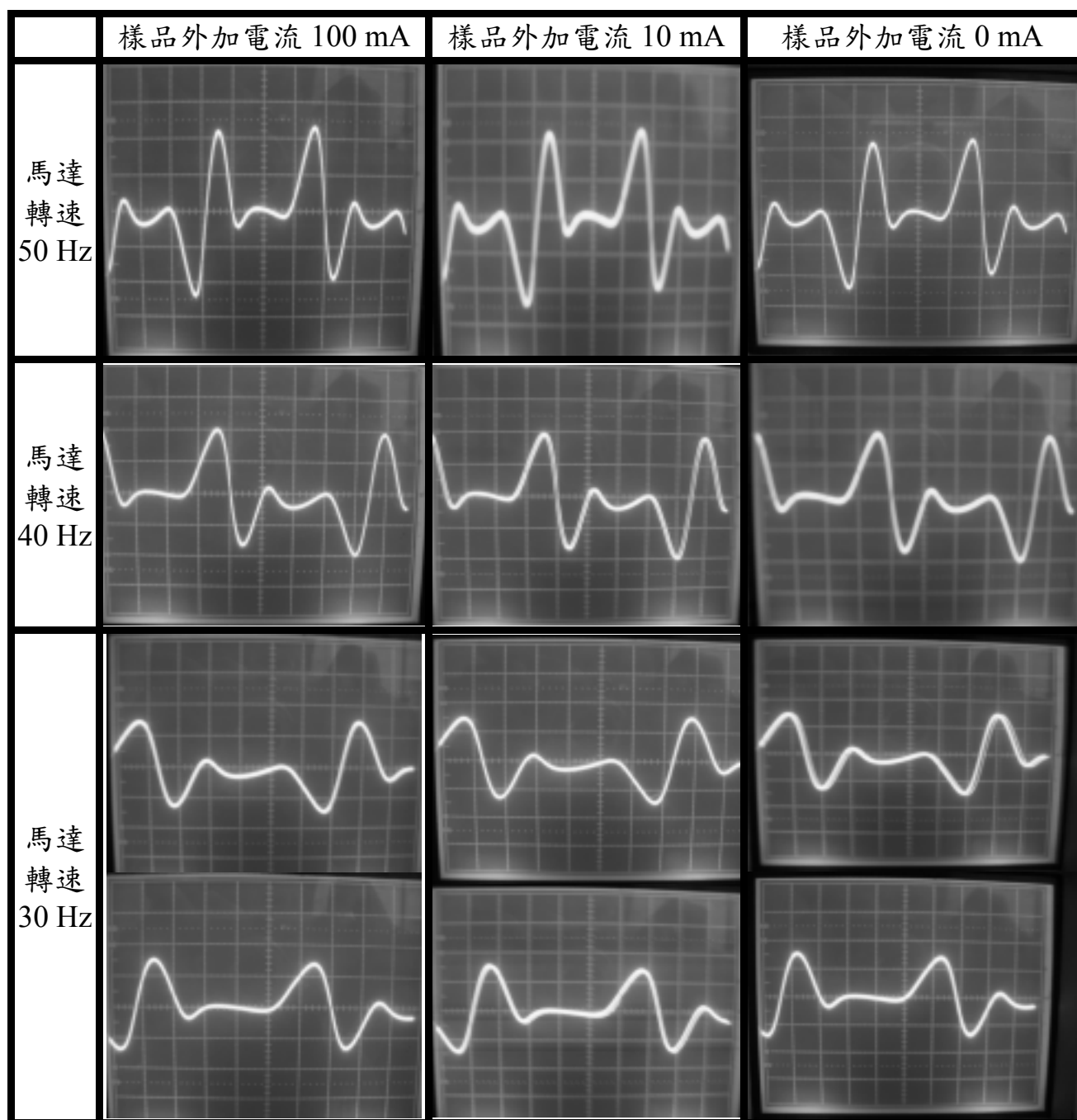
示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms



圖(4-4) 273 K 樣品感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

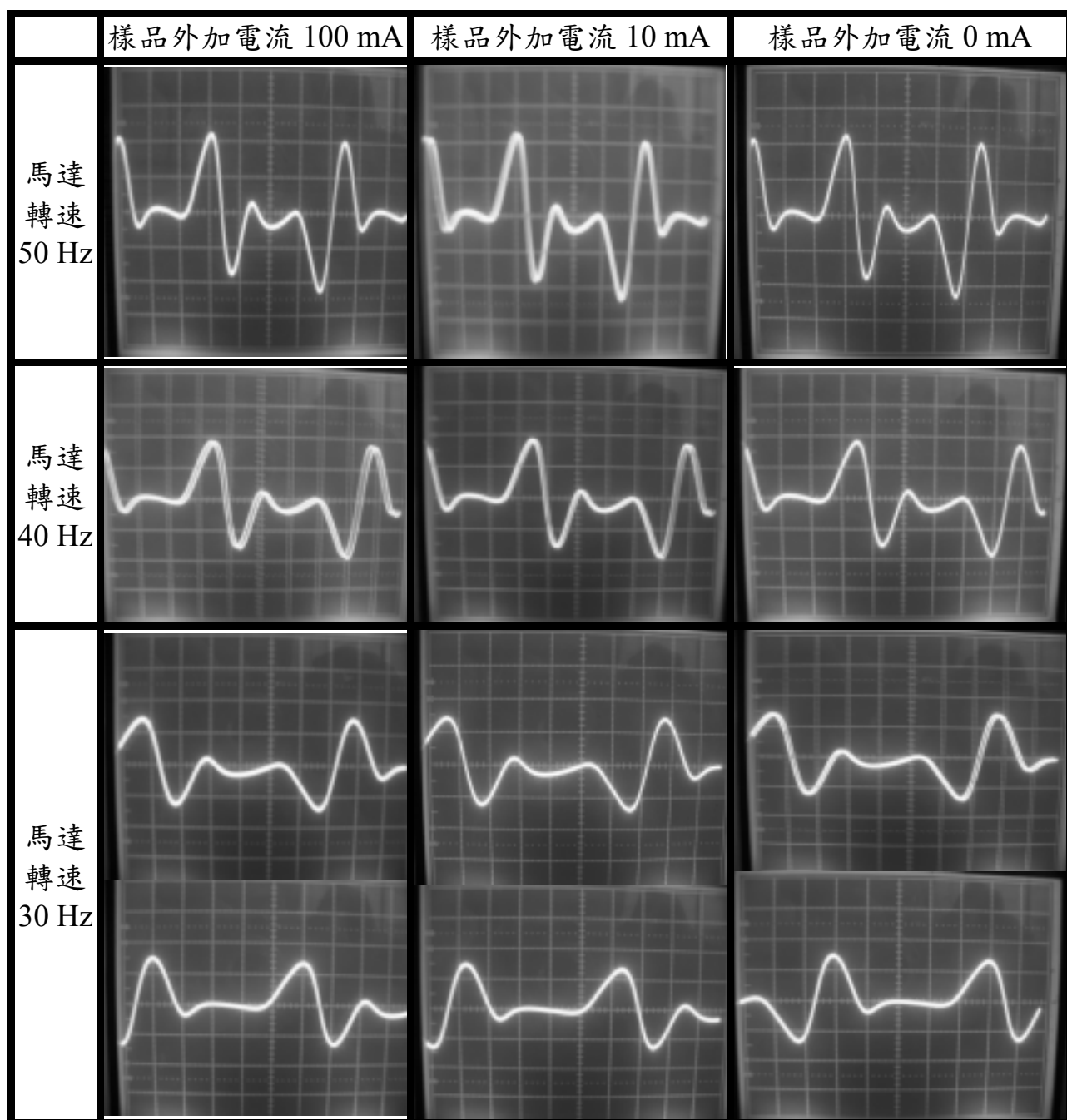
示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms



圖(4-5) 200 K 樣品感應電壓訊號

Time constant : $300\ \mu\text{s}$ 、Sensitivity : $5\ \text{mV}$ 、Phase : 74.86°

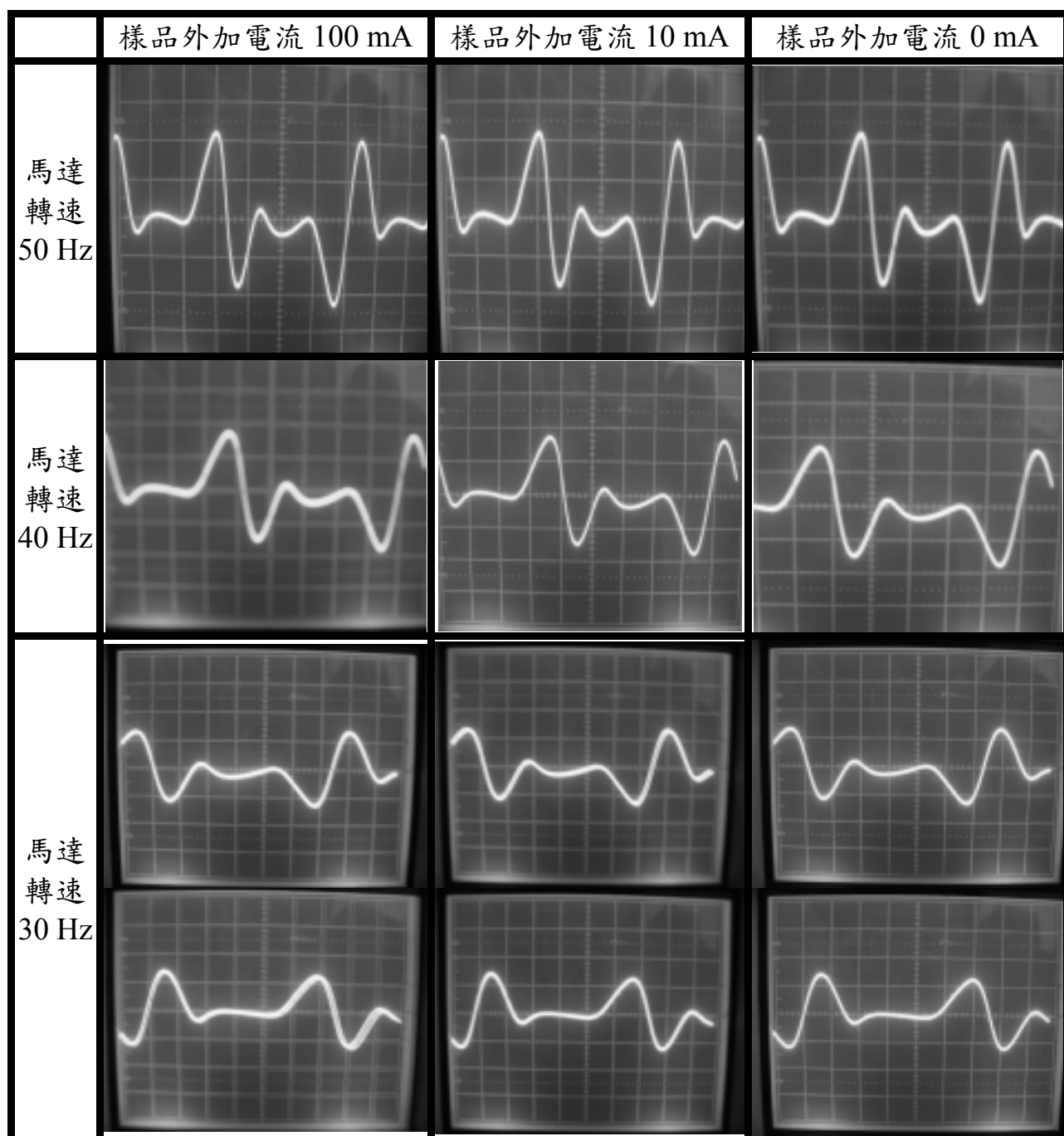
示波器的 Volt & Time 分別為 $2\ \text{V}$ & $5\ \text{ms}$



圖(4-6) 150 K 樣品感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

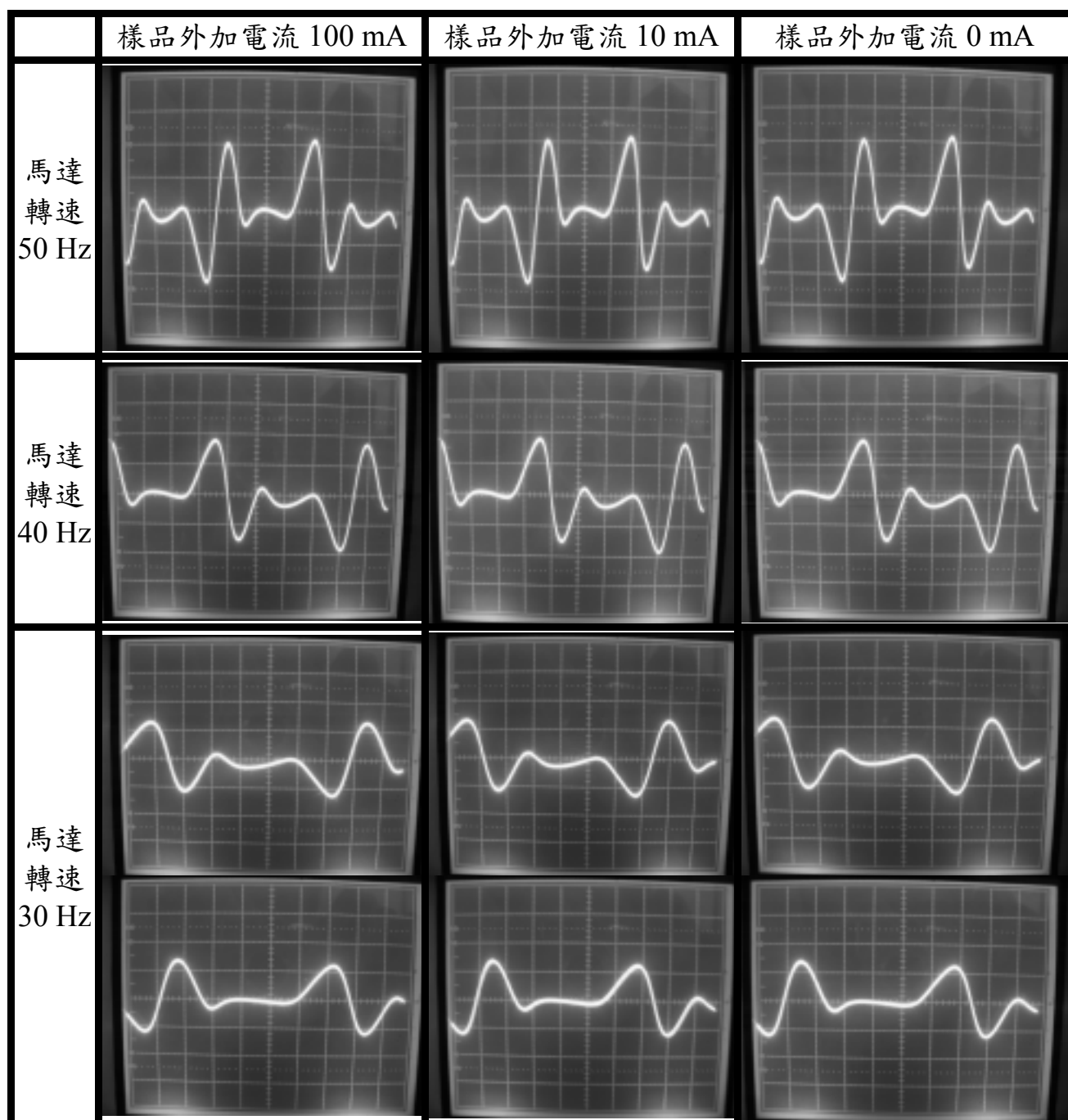
示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms



圖(4-7) 95 K 樣品感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

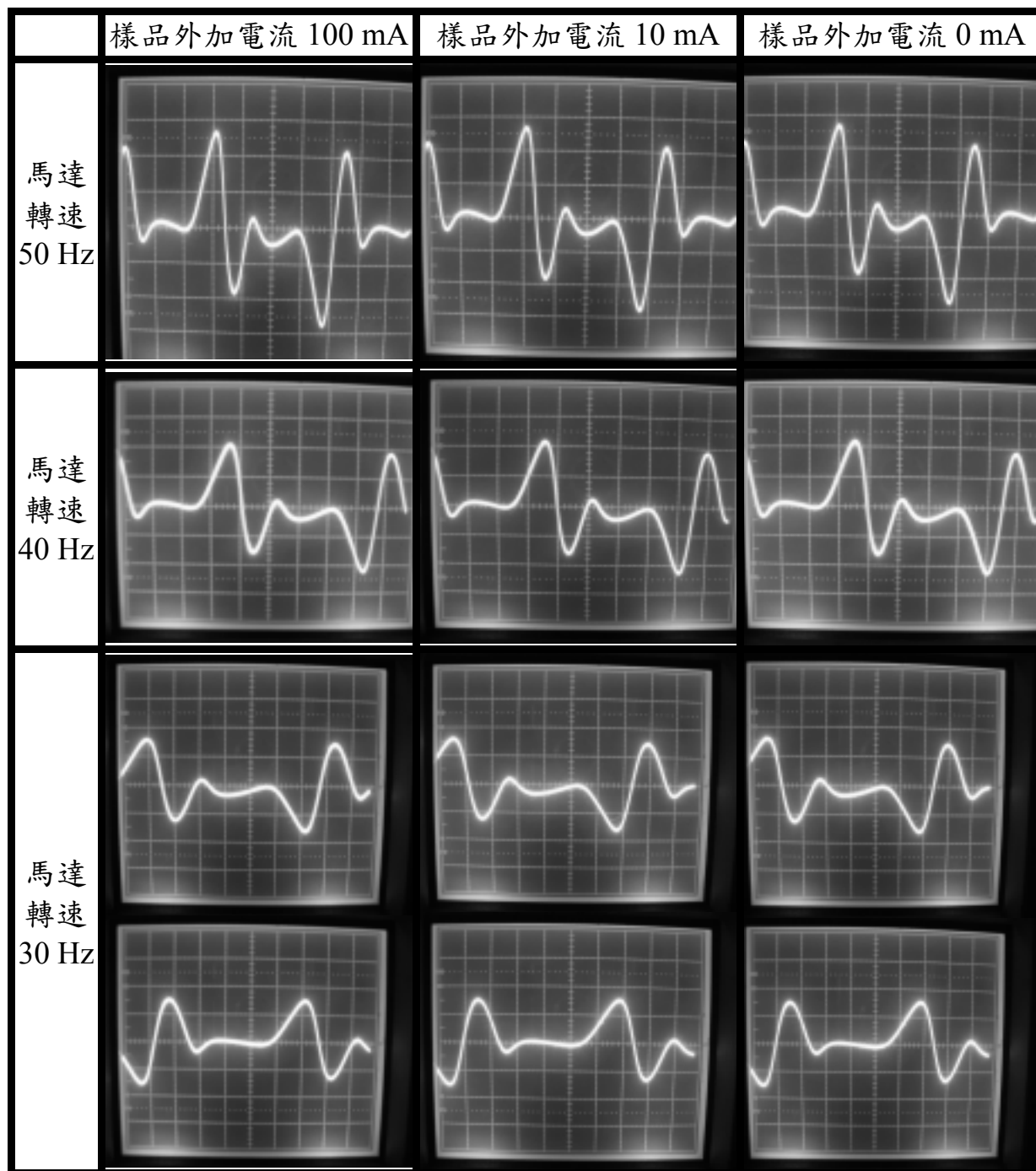
示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms



圖(4-8) 93 K 樣品感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

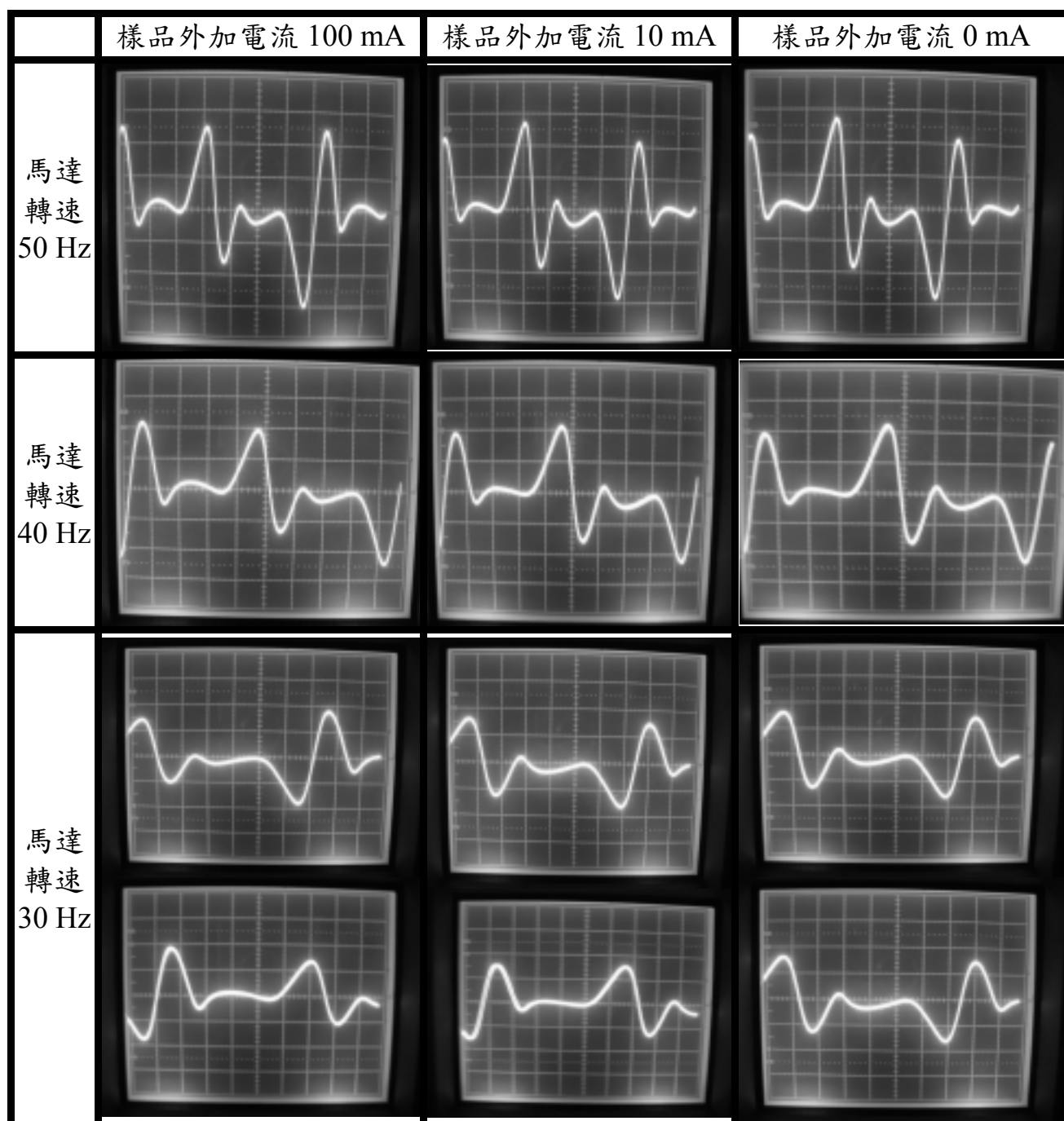
示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms



圖(4-9) 91 K 樣品感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

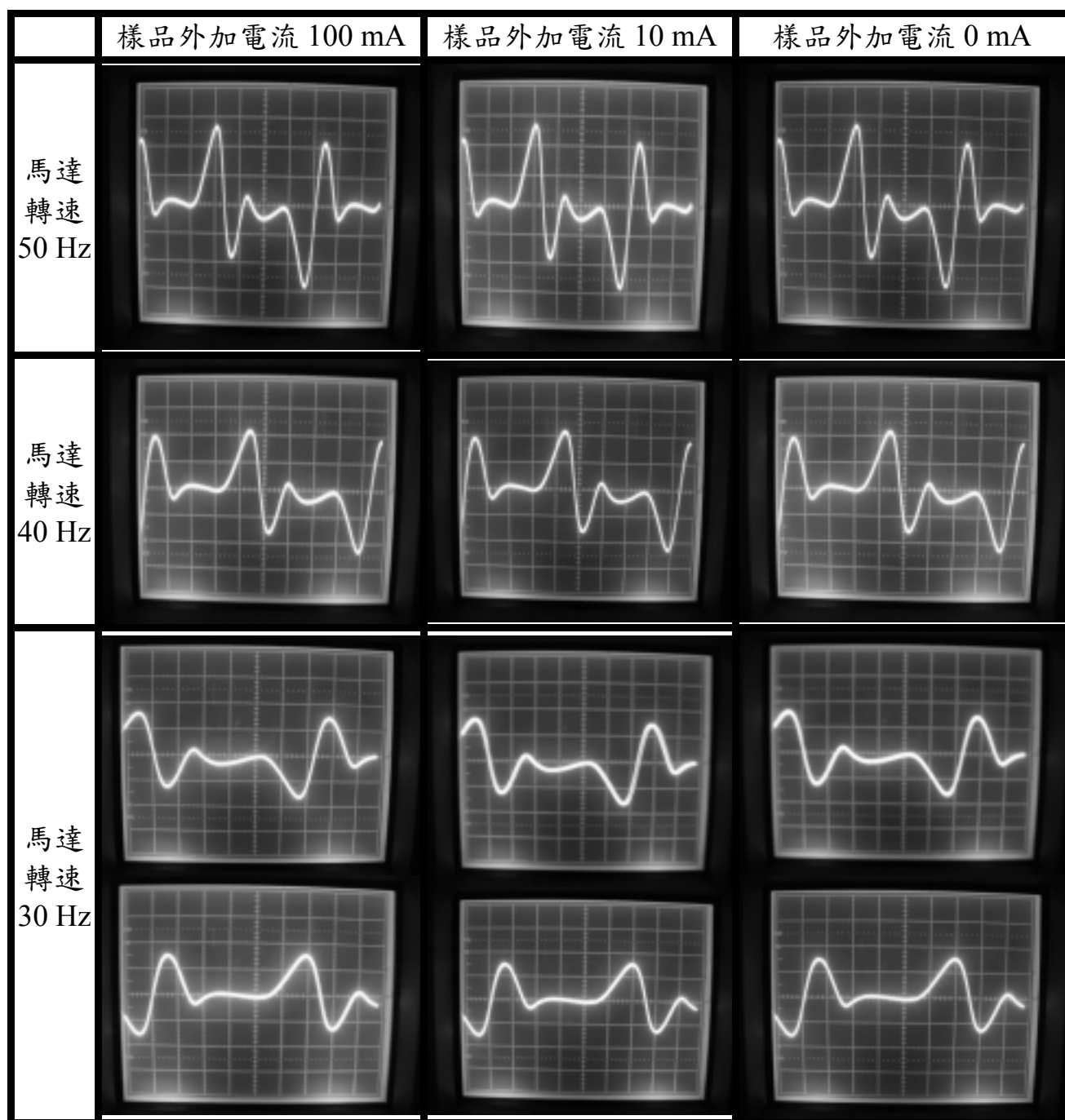
示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms



圖(4-10) 89 K 樣品感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

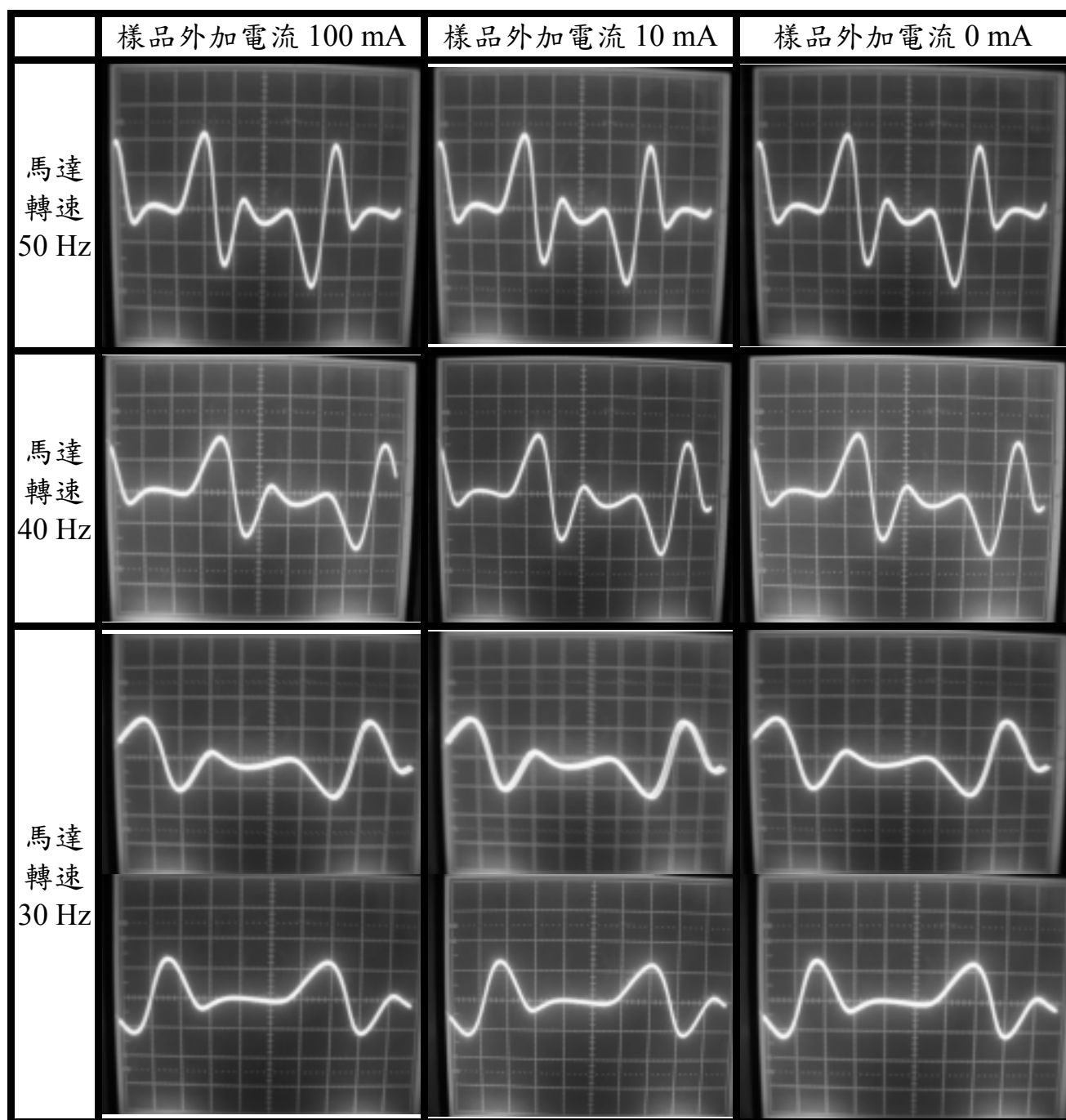
示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms



圖(4-11) 85 K 樣品感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

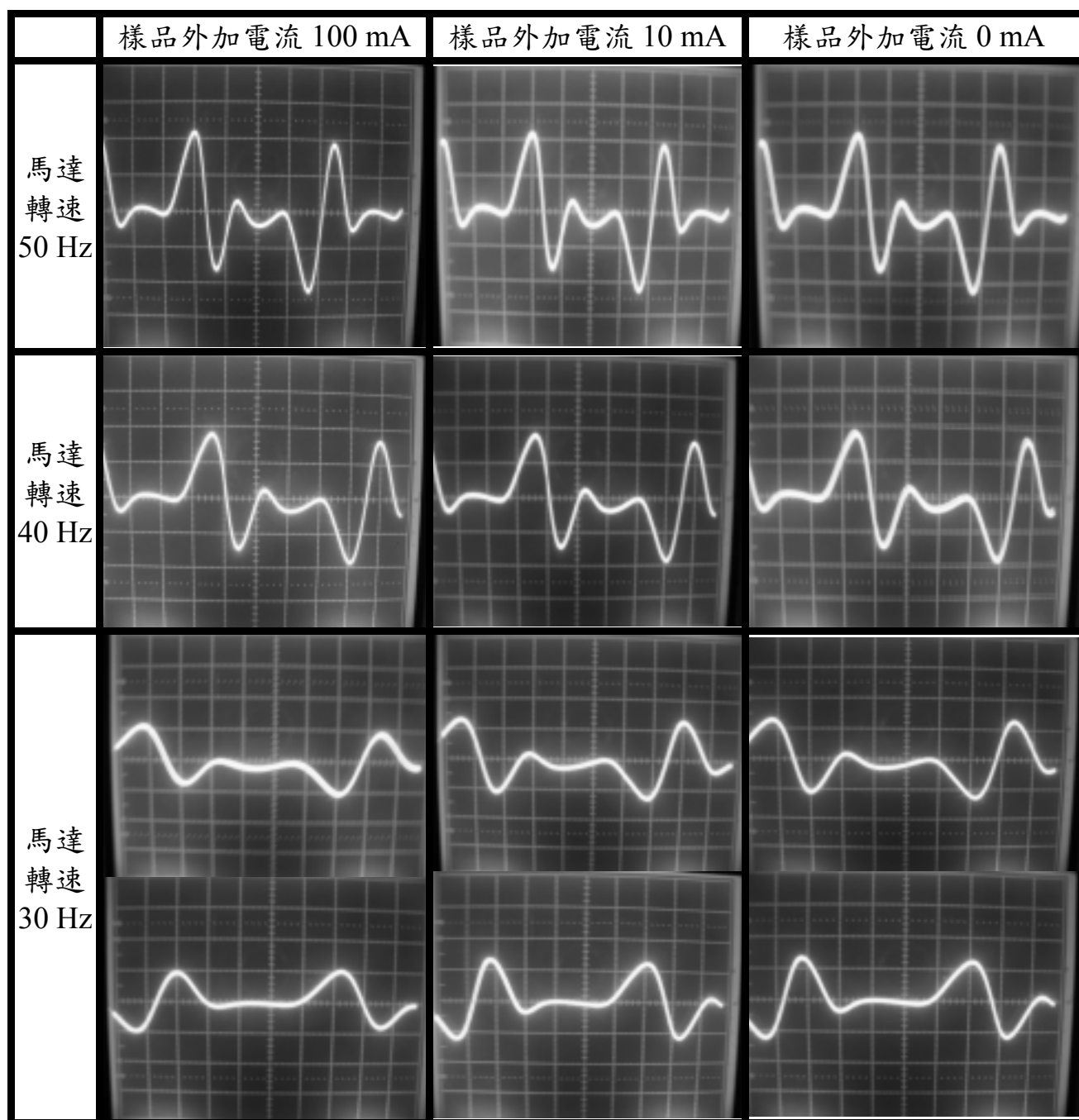
示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms



圖(4-12) 77 K 樣品感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

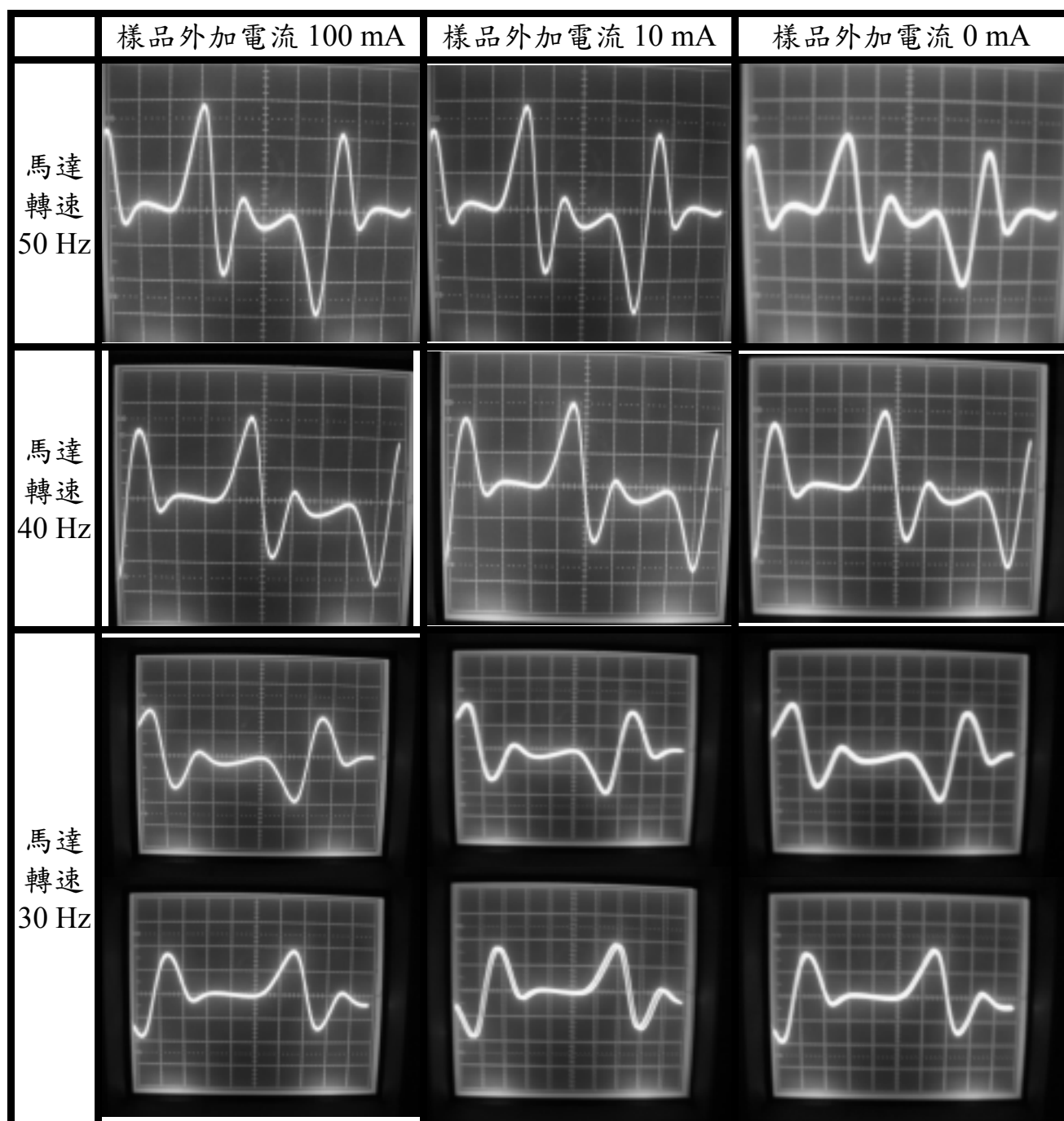
示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms



圖(4-13) 60 K 樣品感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

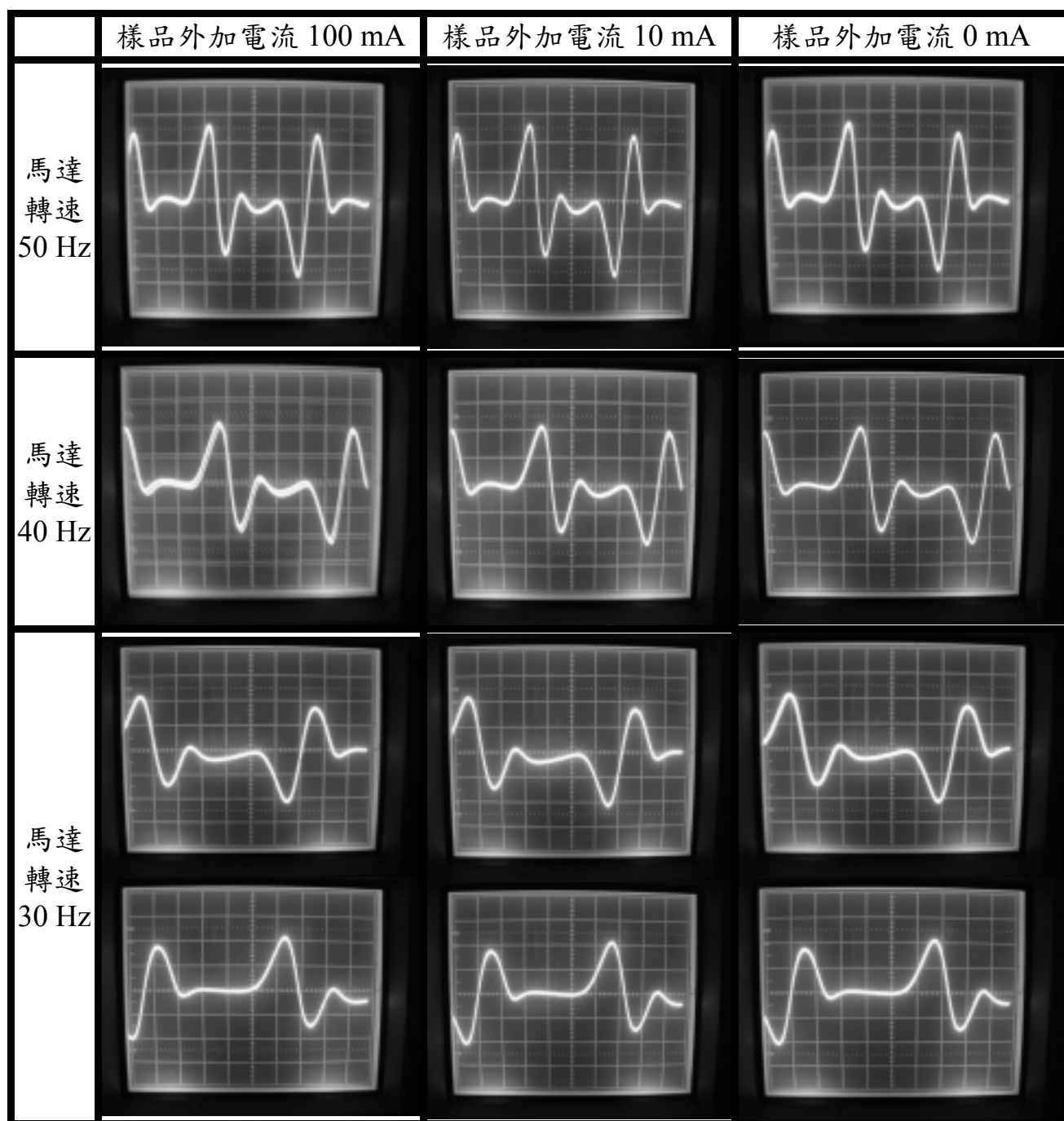
示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms



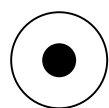
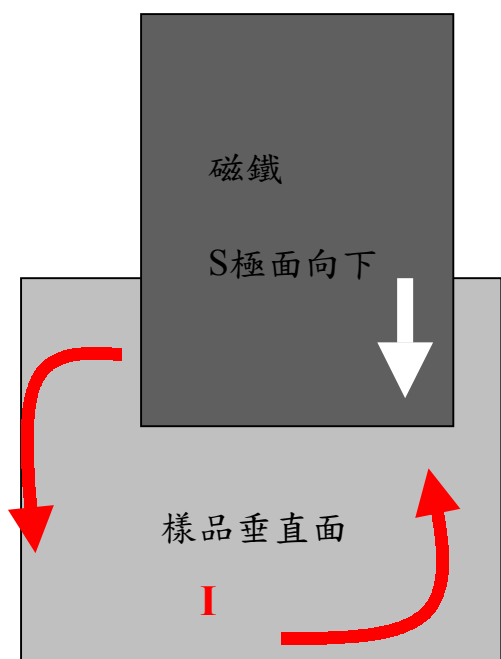
圖(4-14) 50 K 樣品感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms

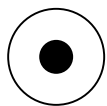
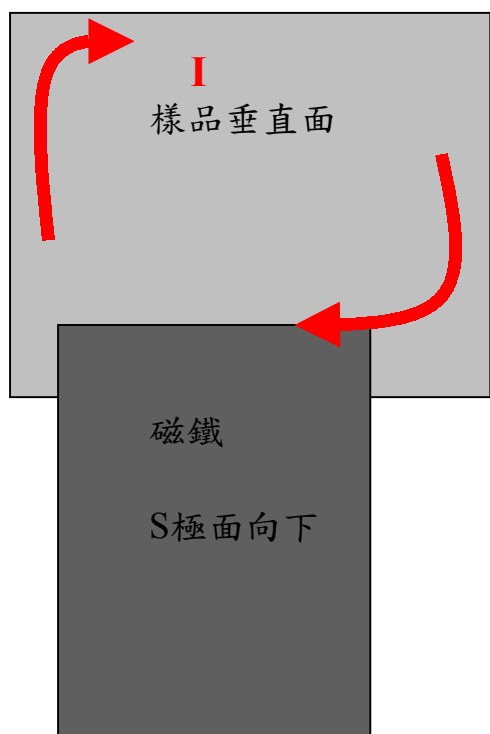
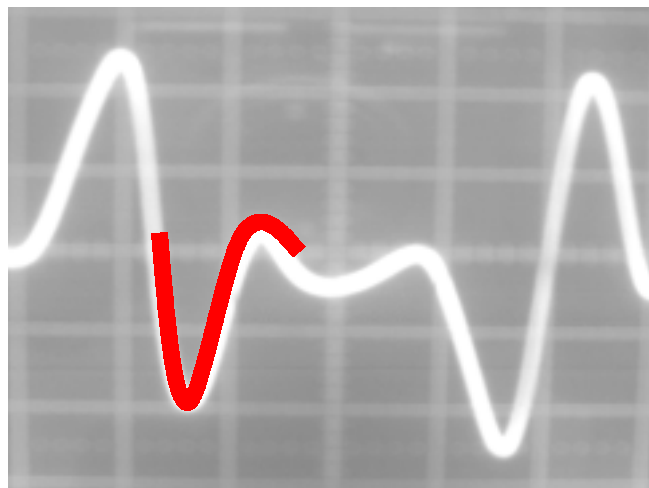


圖(4-15) 輔助解說圖



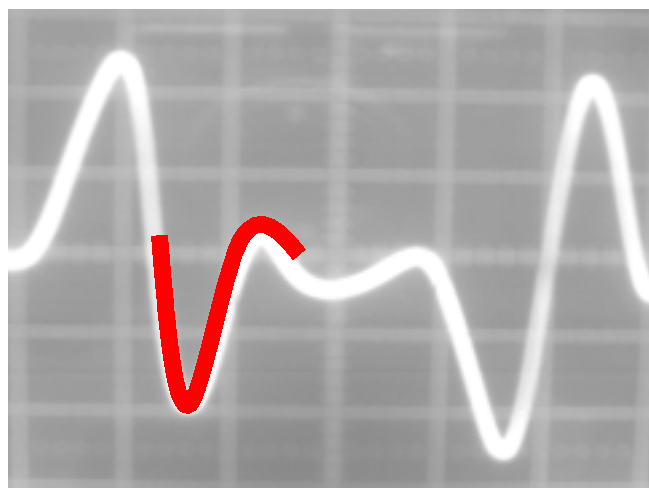
H

磁鐵剛進入樣品面上方



H

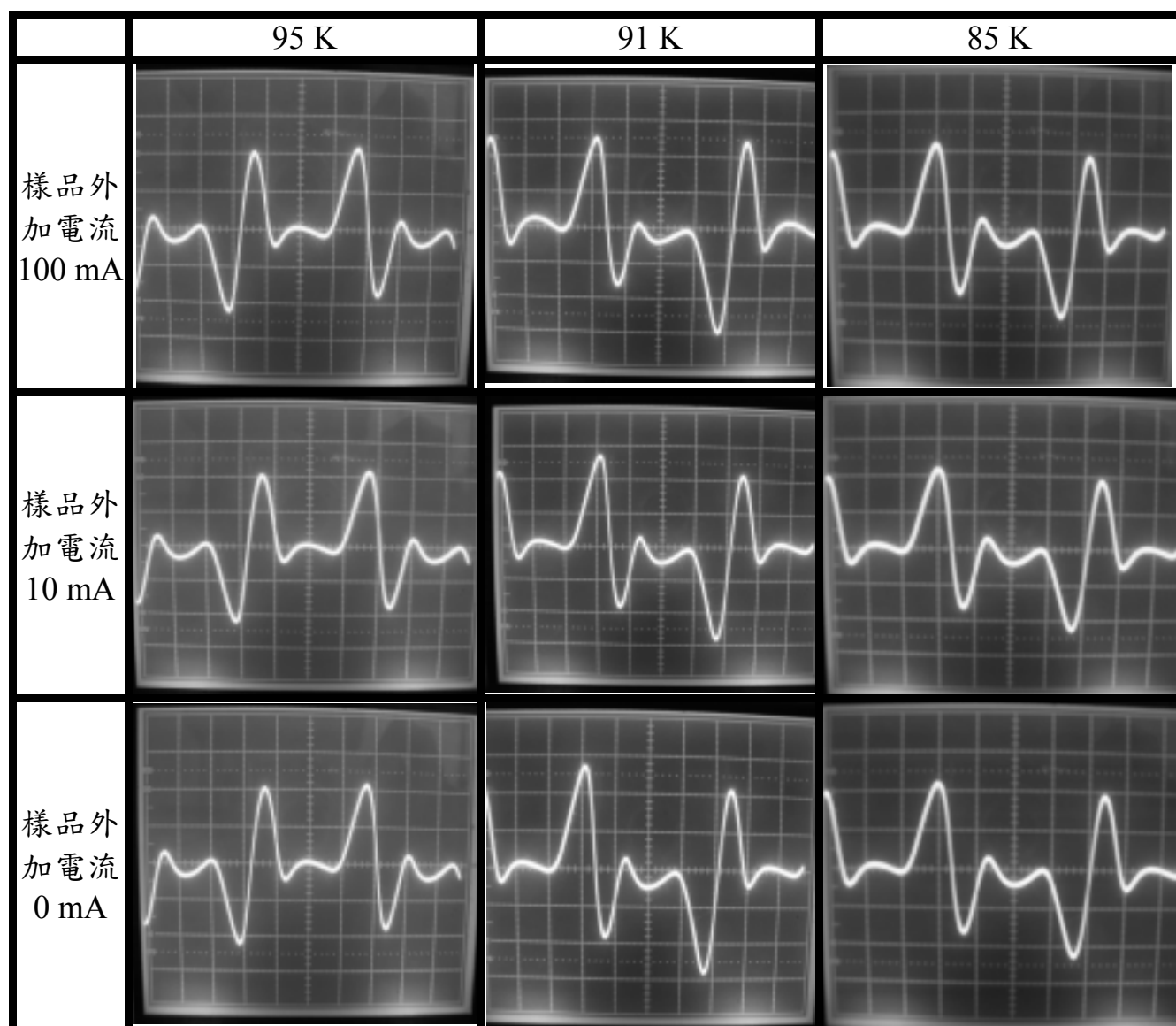
磁鐵離開樣品面上方



圖(4-16) 馬達轉速 50 Hz 時樣品感應電壓訊號

Time constant : $300\ \mu\text{s}$ 、 Sensitivity : 5 mV 、 Phase : 74.86°

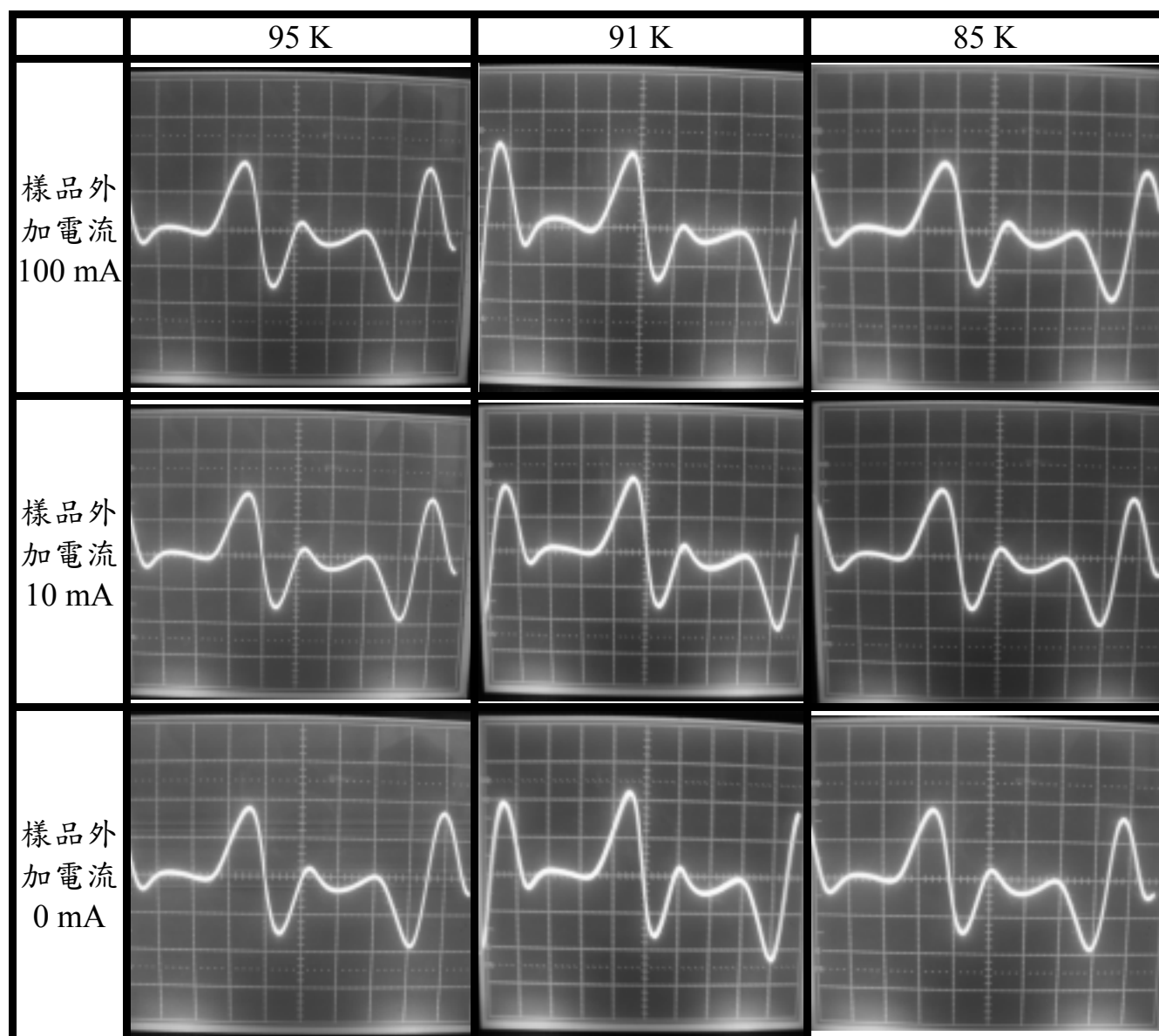
示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms



圖(4-17) 馬達轉速 40 Hz 時樣品感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms



圖(4-18) 馬達轉速 30 Hz 時樣品感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

示波器的 Volt & Time 分別為 2 Volt & 5 ms

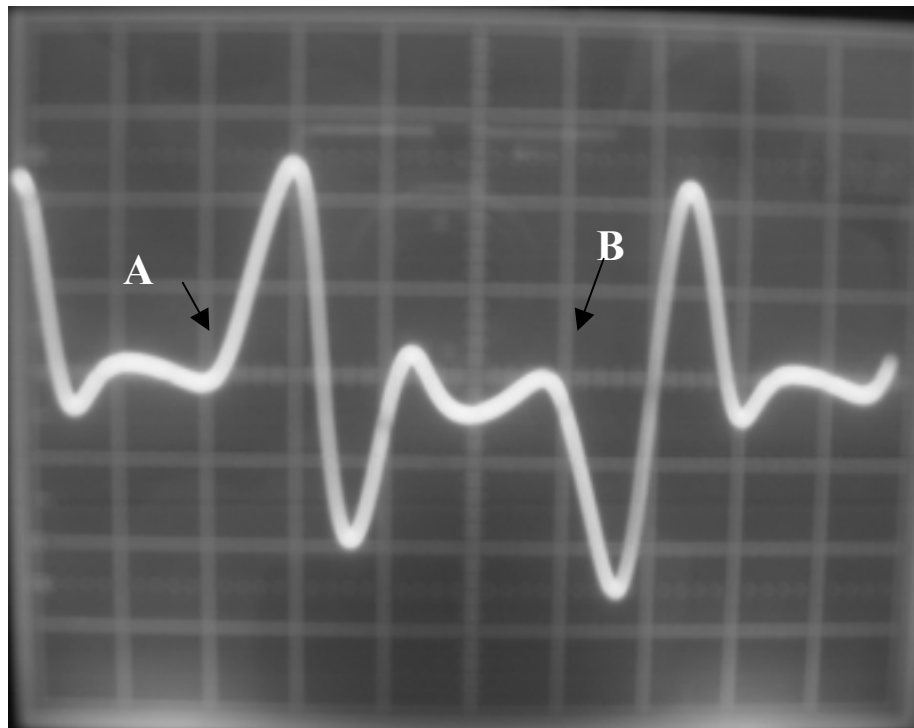


圖(4-19) 樣品與電熱絲感應電壓訊號的比較

Time constant : $300\ \mu\text{s}$ 、 Sensitivity : $5\ \text{mV}$ 、 Phase : 74.86°

示波器的 Volt & Time 分別為 $1\ \text{V}$ & $5\ \text{ms}$

樣品 295 K , 50 Hz

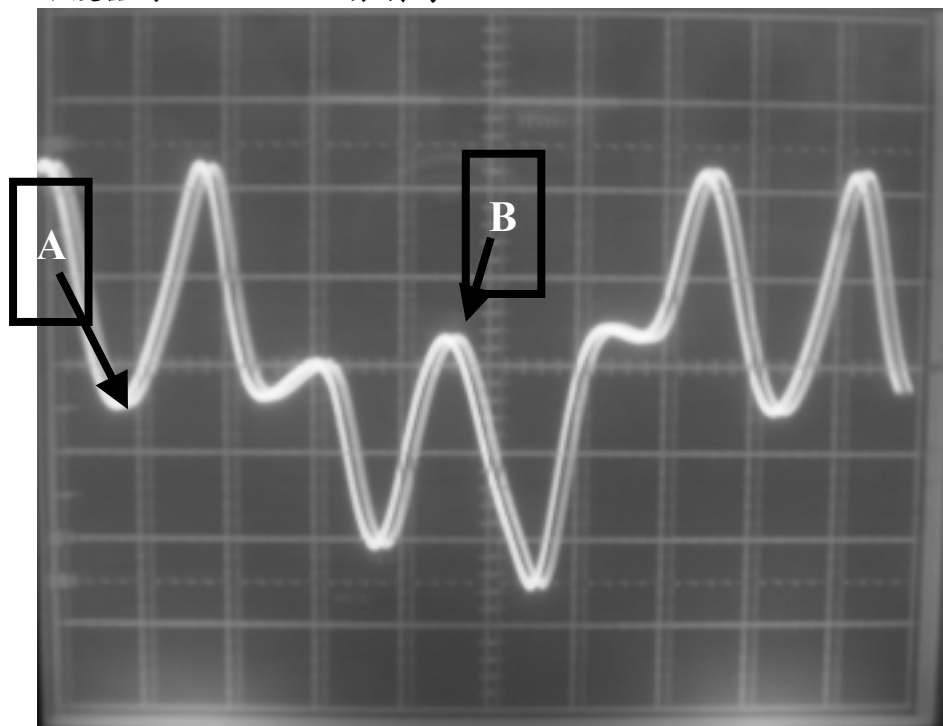


+0 mA

電熱絲 295 K , 50 Hz

Time constant : $300\ \mu\text{s}$ 、 Sensitivity : $5\ \text{mV}$ 、 Phase : 74.86°

示波器的 Volt & Time 分別為 $1\ \text{V}$ & $5\ \text{ms}$

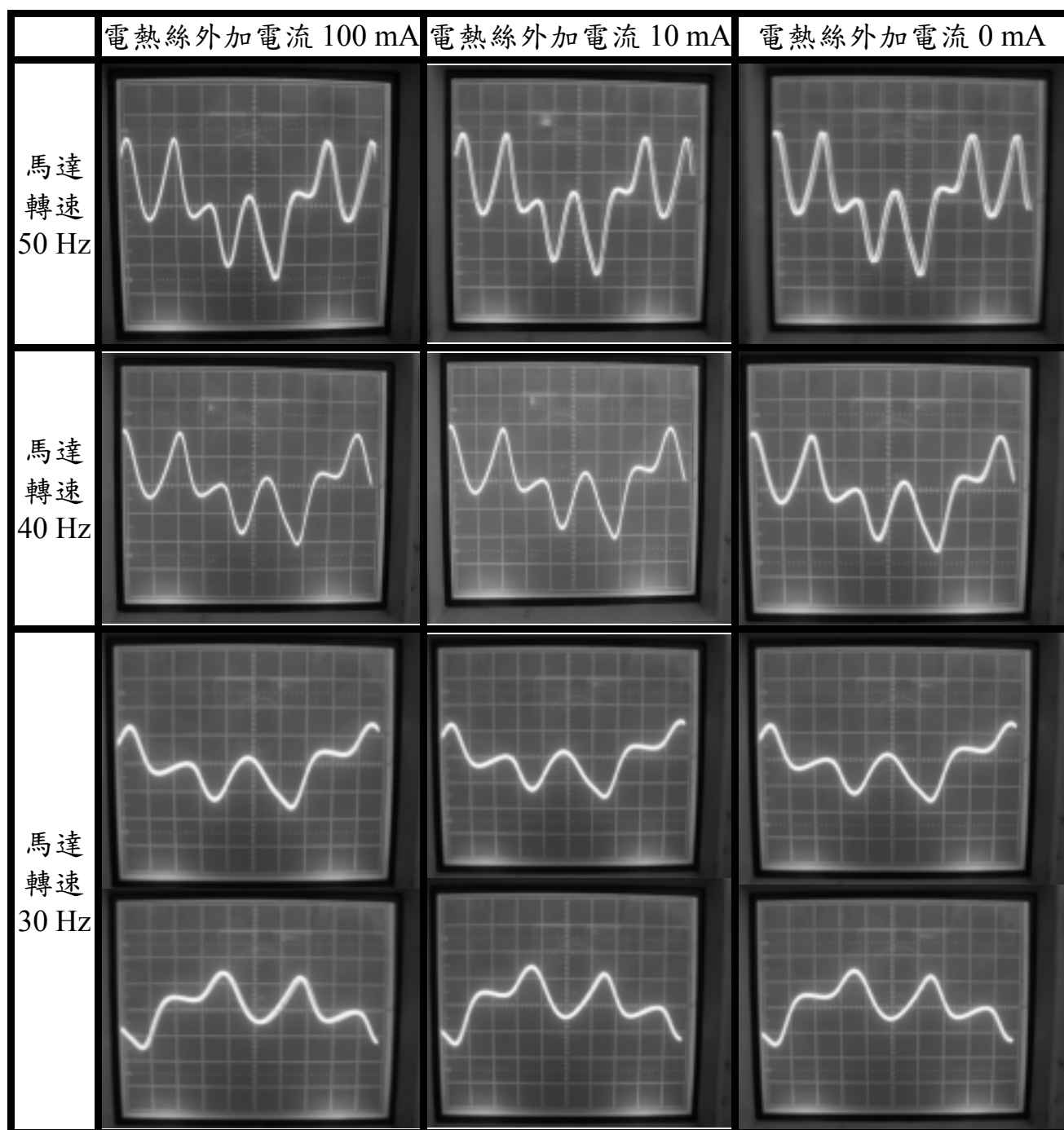


+0 mA

圖(4-20) 295 K 電熱絲的感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

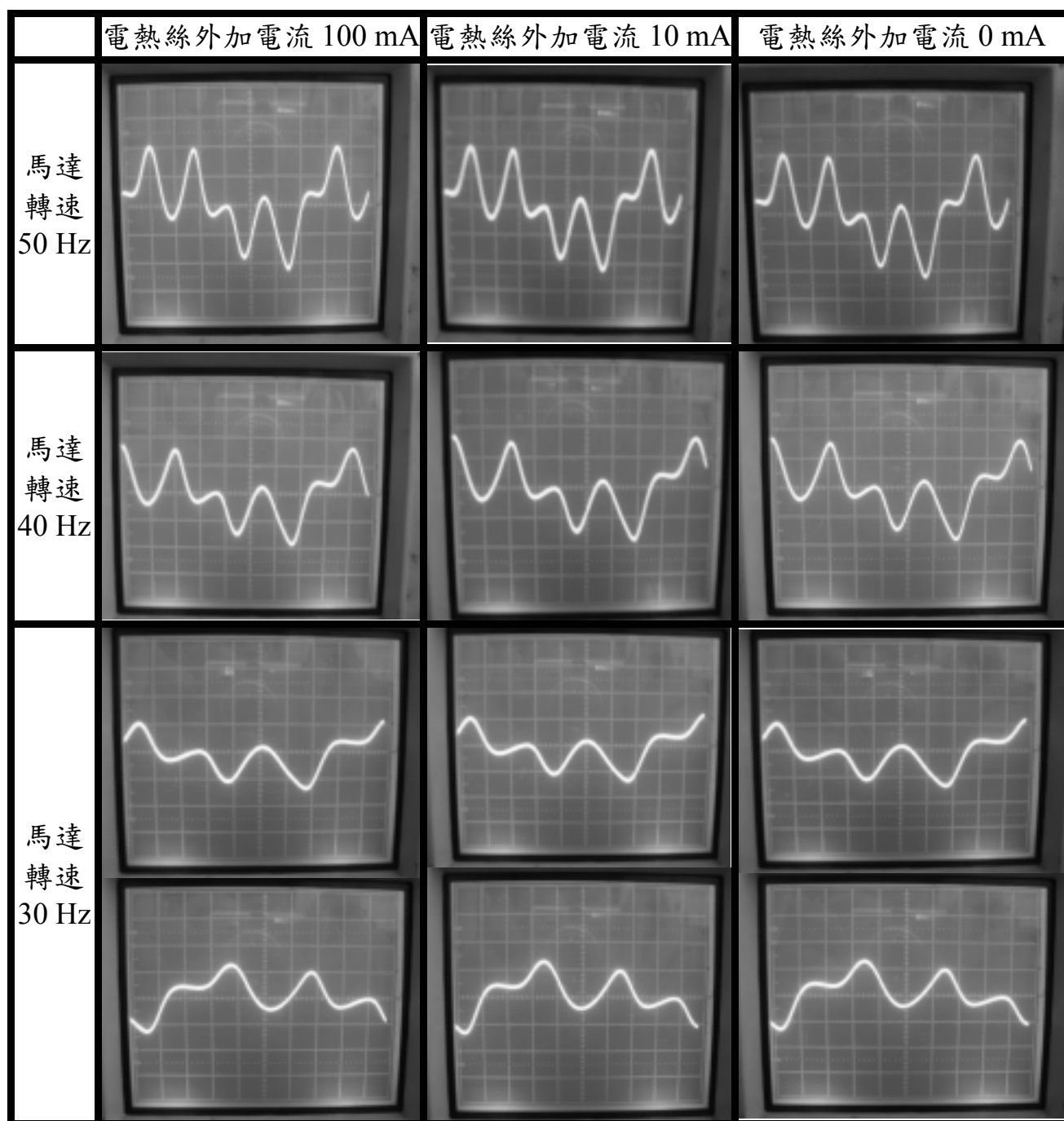
示波器的 Volt & Time 分別為 1 Volt & 5 ms



圖(4-21) 95 K 電熱絲的感應電壓訊號

Time constant : $300\ \mu\text{s}$ 、Sensitivity : $5\ \text{mV}$ 、Phase : 74.86°

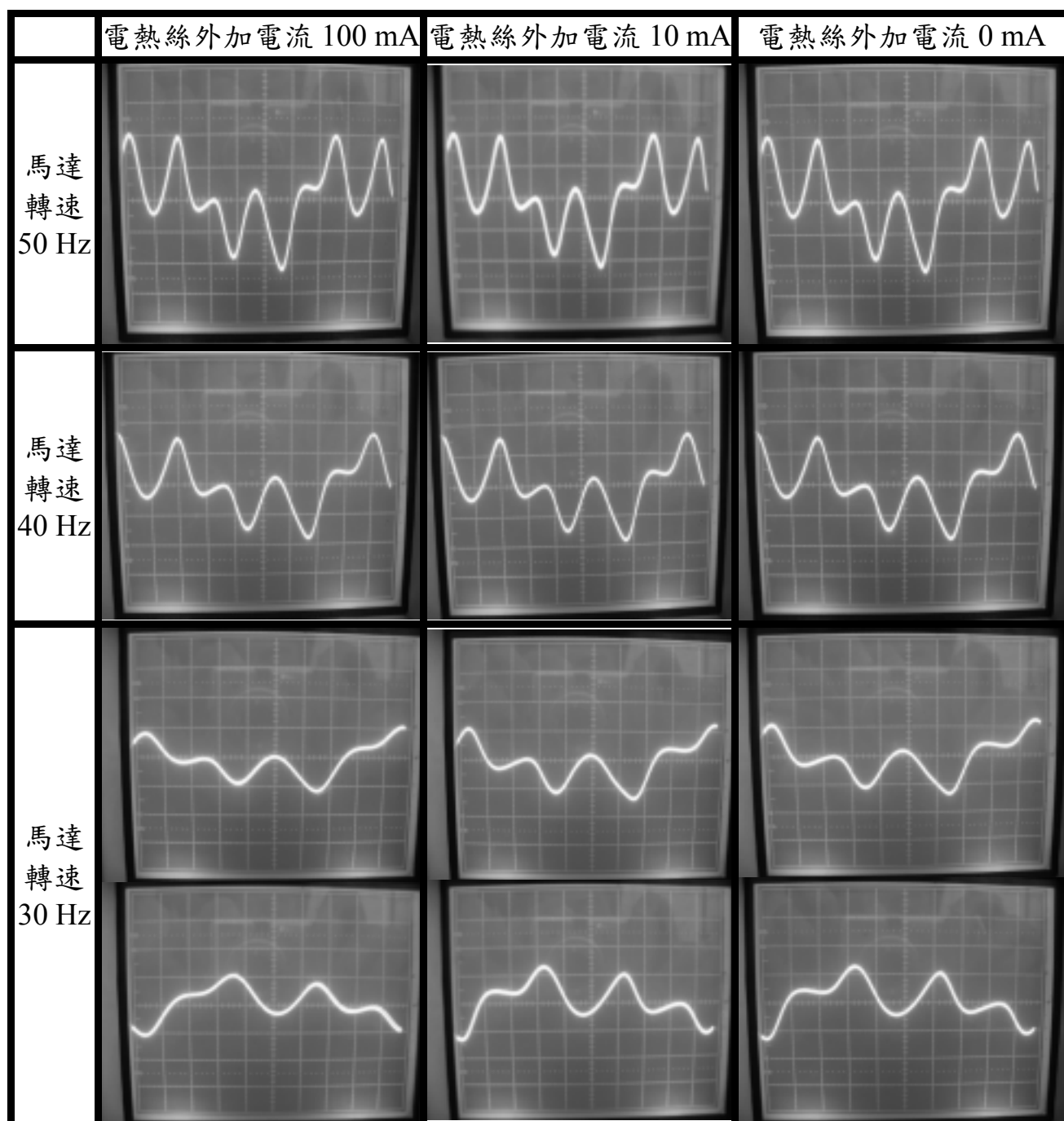
示波器的 Volt & Time 分別為 $1\ \text{V}$ & $5\ \text{ms}$



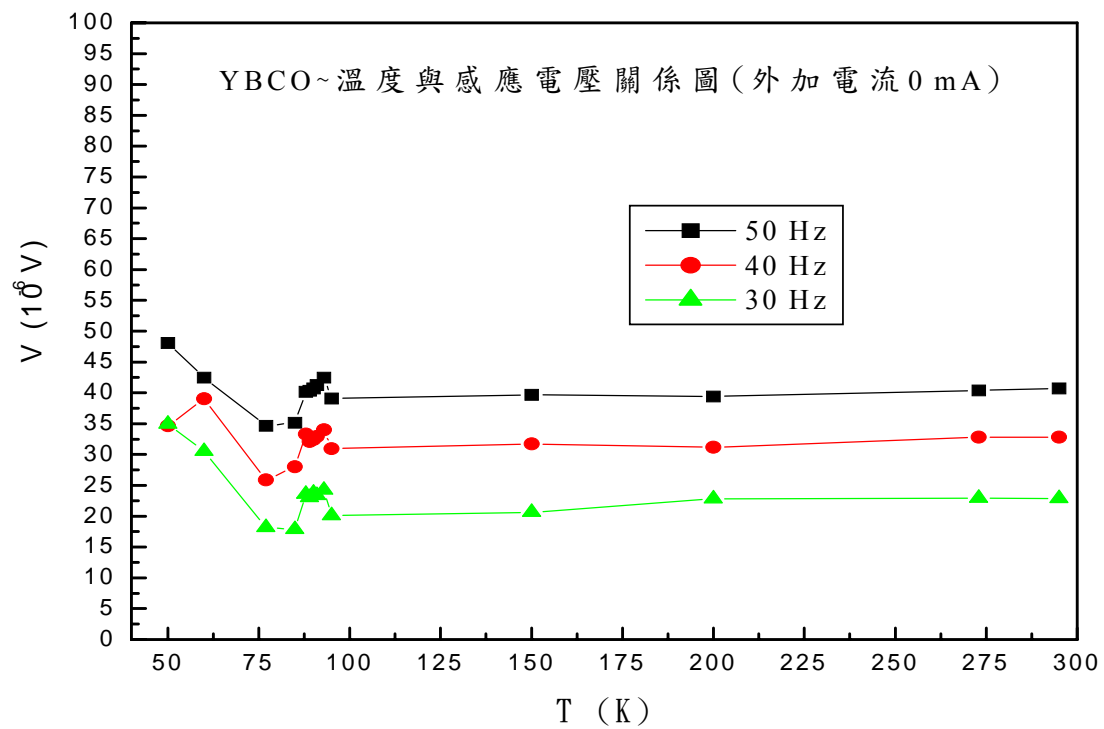
圖(4-22) 77 K 電熱絲的感應電壓訊號

Time constant : 300 μ s 、Sensitivity : 5 mV 、Phase : 74.86 °

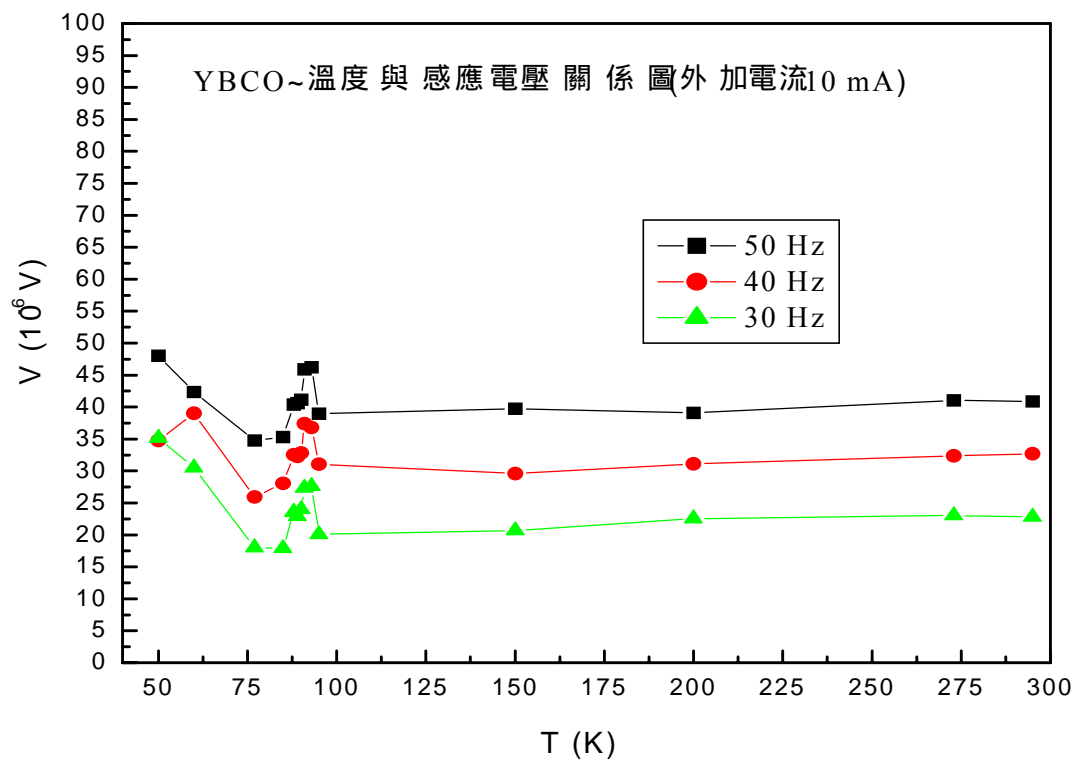
示波器的 Volt & Time 分別為 1 Volt & 5 ms



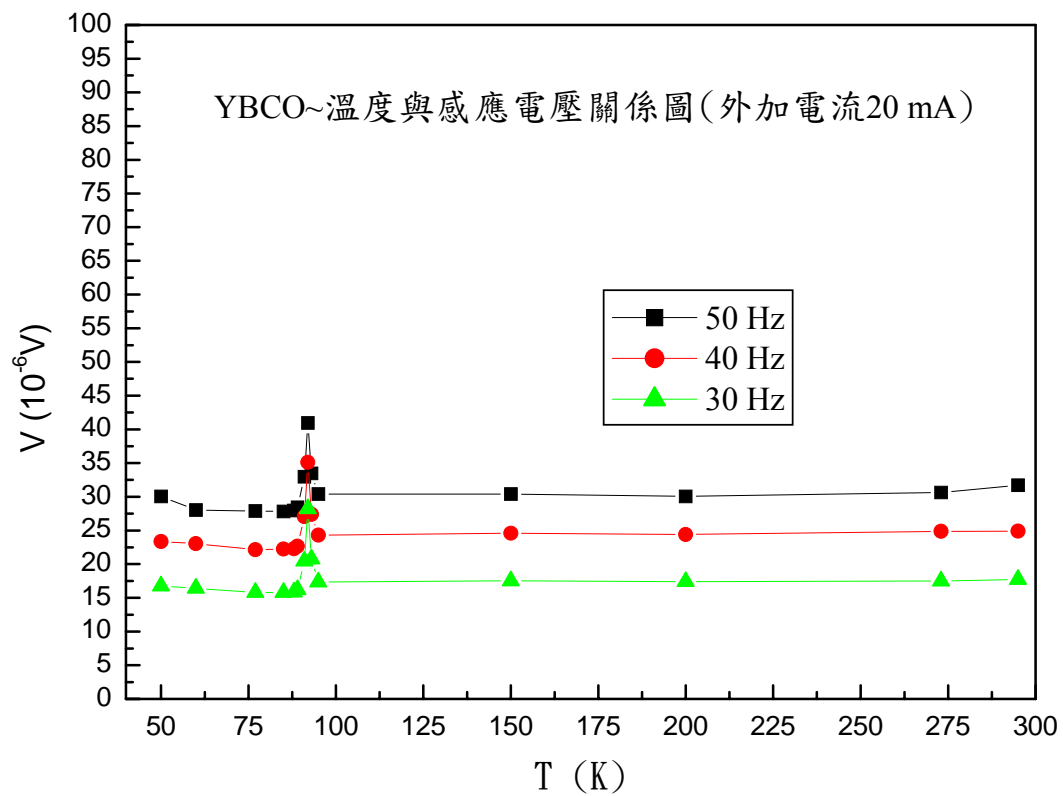
圖(4-23) 溫度與 YBCO 感應電壓的關係圖(外加電流 0 mA)



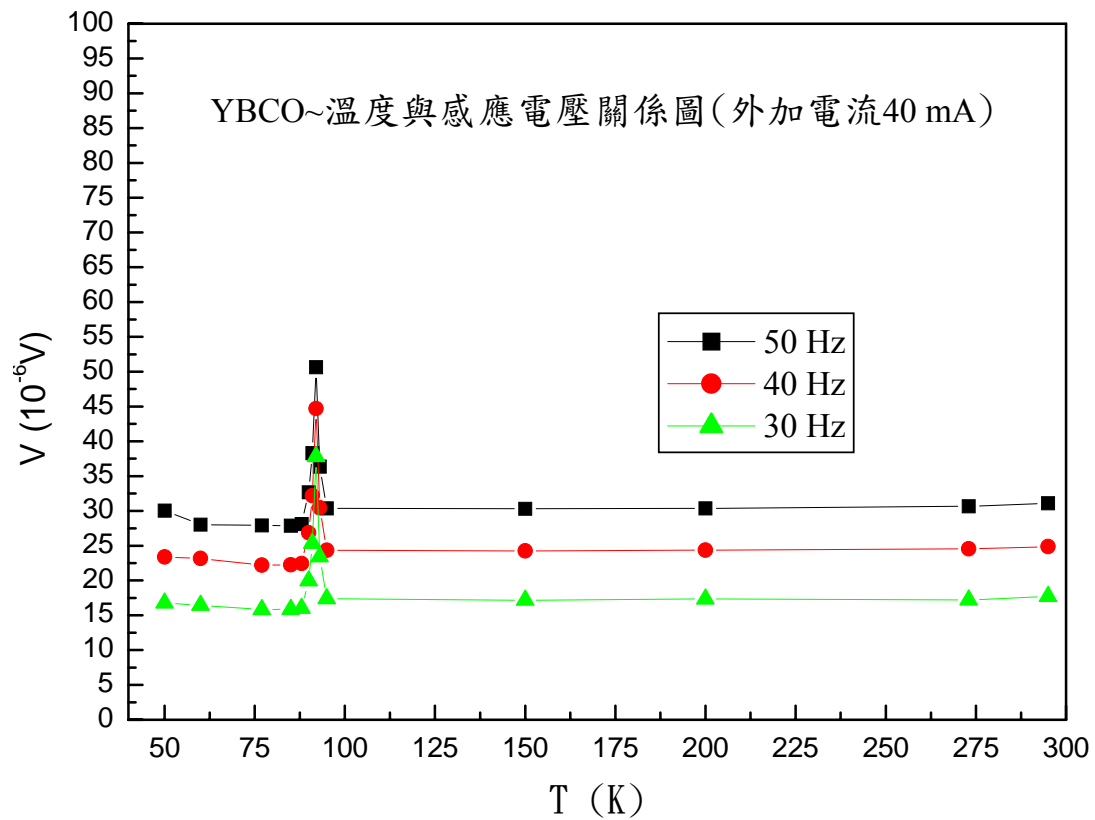
圖(4-24) 溫度與 YBCO 感應電壓的關係圖(外加電流 10 mA)



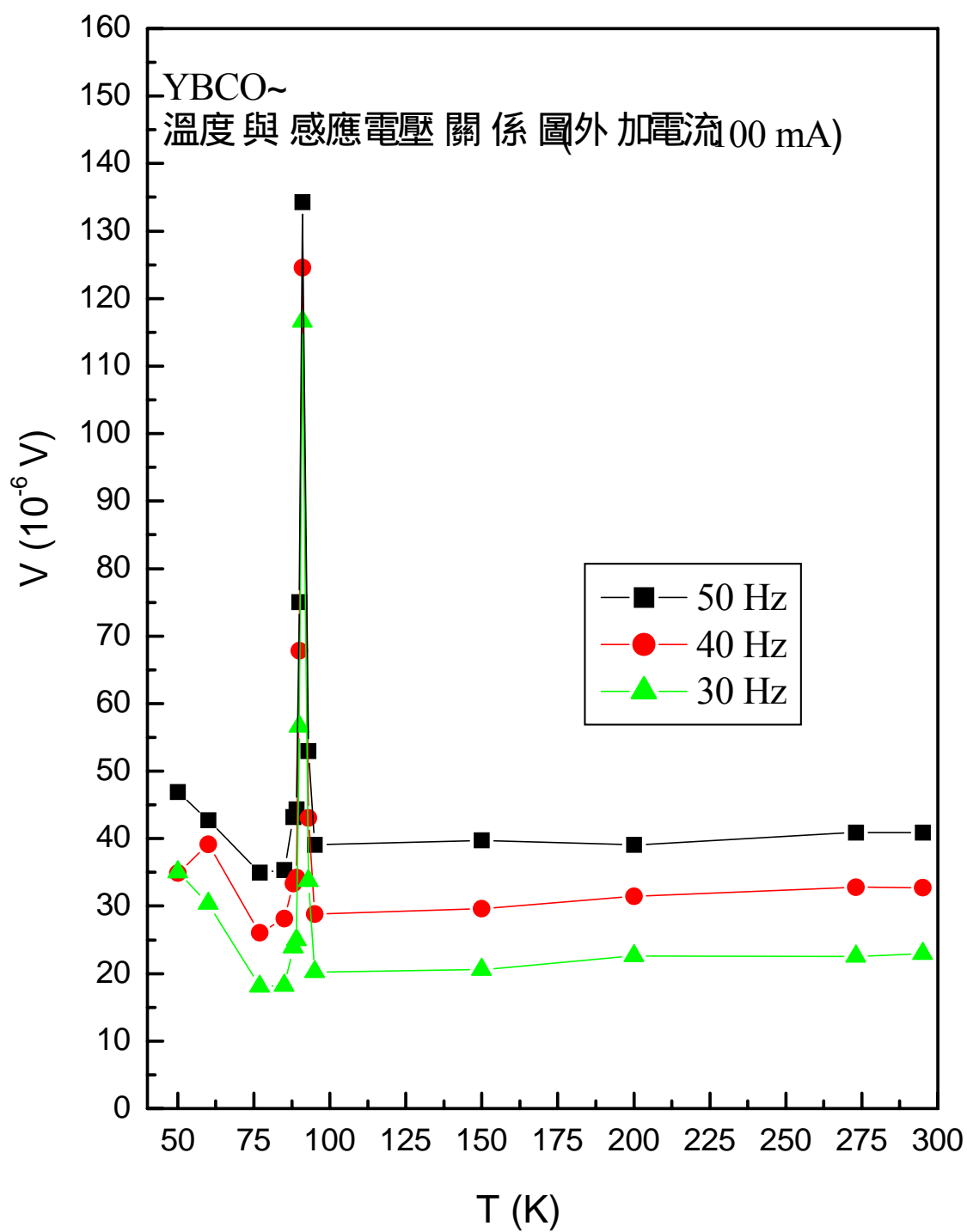
圖(4-25) 溫度與 YBCO 感應電壓的關係圖(外加電流 20 mA)



圖(4-26) 溫度與 YBCO 感應電壓的關係圖(外加電流 40 mA)

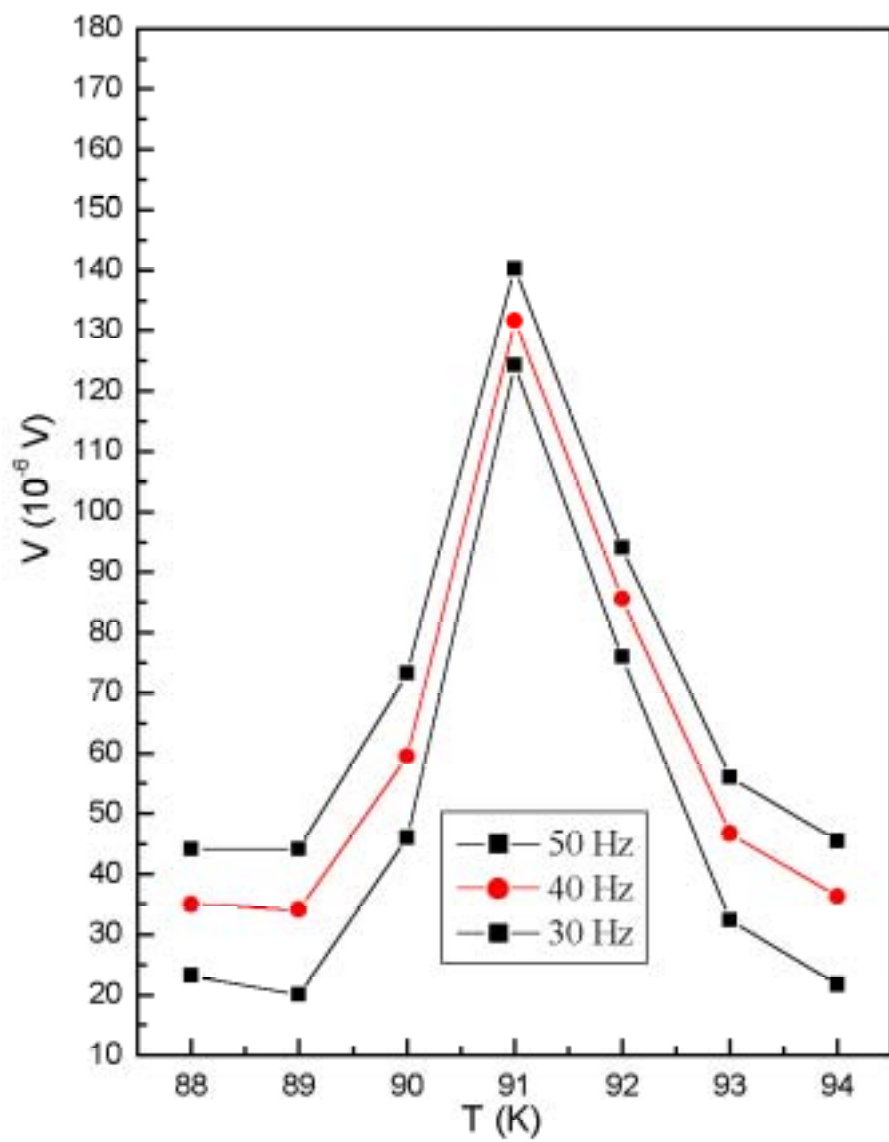


圖(4-27) 溫度與 YBCO 感應電壓的關係圖(外加電流 100 mA)

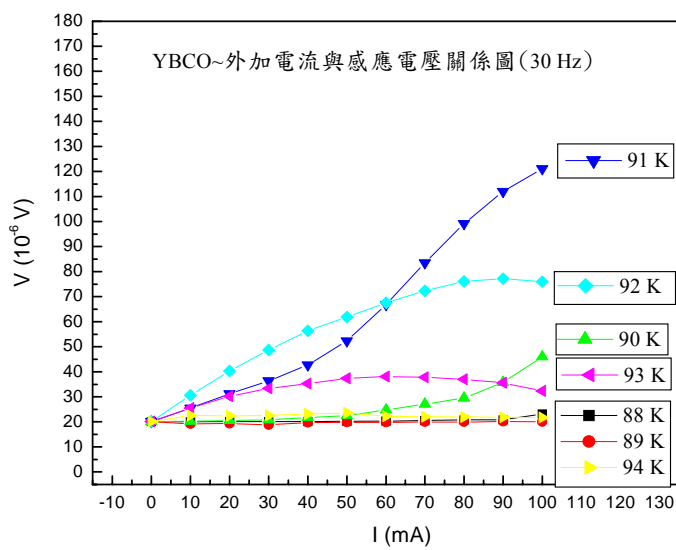
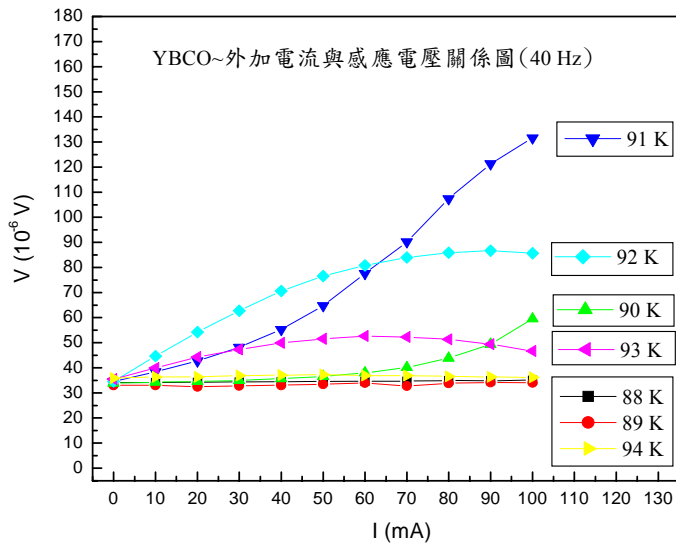
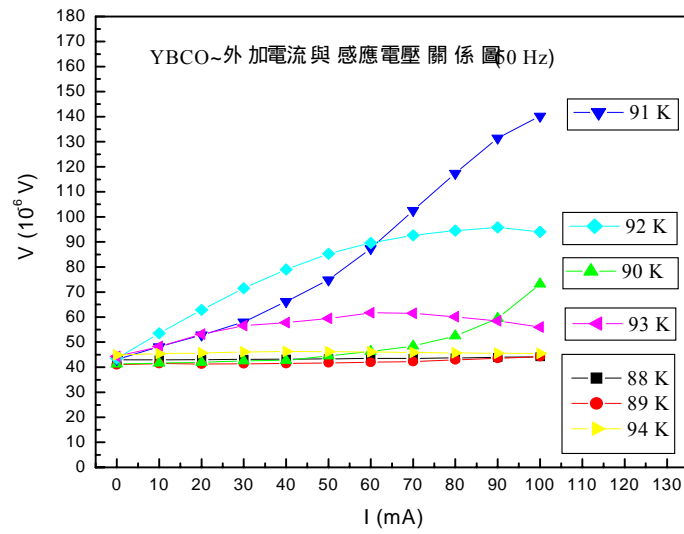


圖(4-28) 超導轉換區：

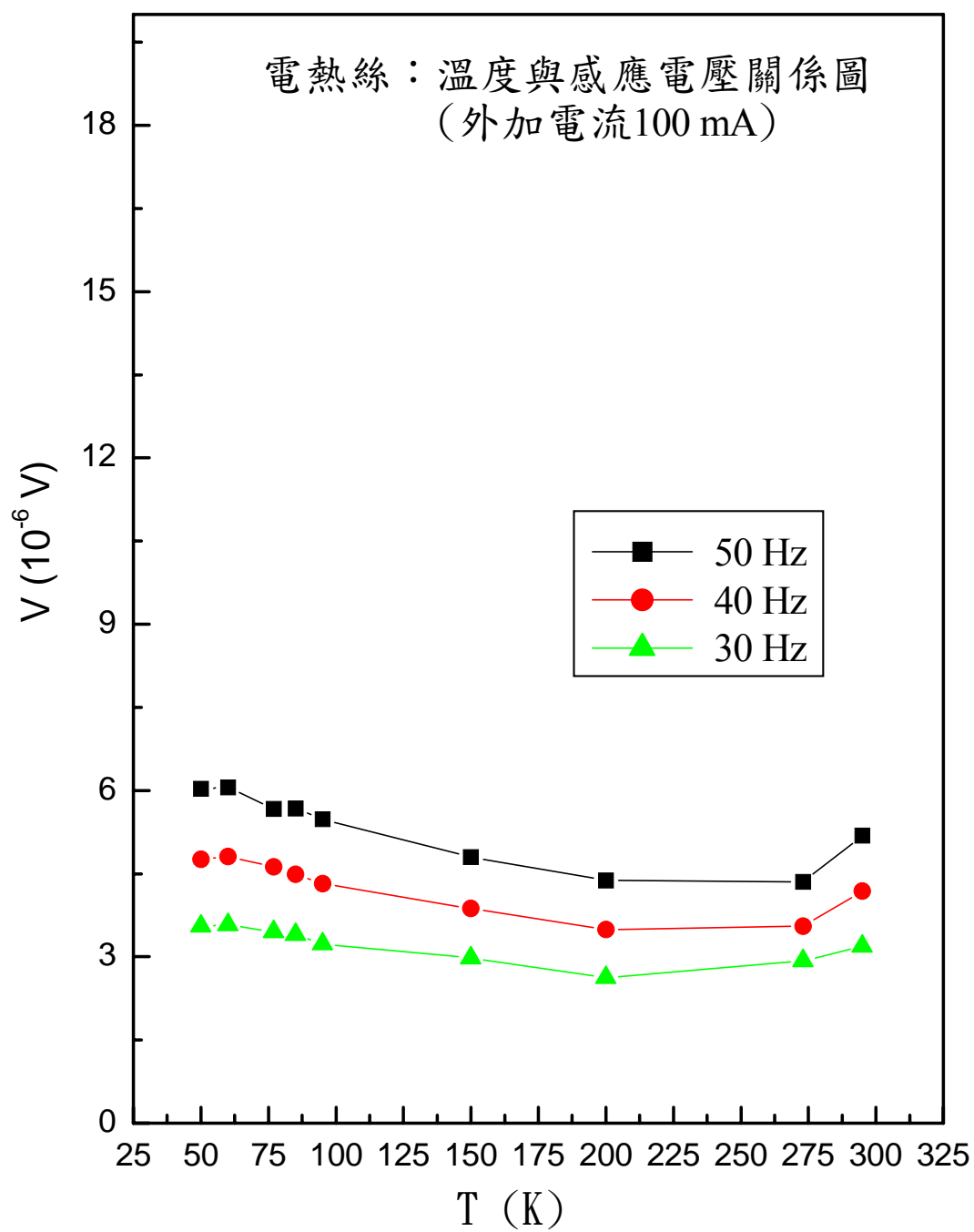
溫度與 YBCO 感應電壓的關係圖(外加電流 100 mA)



圖(4-29) 外加電流與 YBCO 感應電壓的關係圖



圖(4-30) 電熱絲：溫度與感應電壓的關係圖(外加電流 100 mA)



第五章 結論

本實驗室所製作的樣品，是由 YBCO123+211 再利用接晶法所製成的大晶面的 YBCO 超導體，所以我們已將缺陷儘量有順序的摻雜於樣品中。而我們知道，非理想第二類超導，最大的特色就是摻雜許多的缺陷，而所謂磁通釘扎的中心，就是由這些缺陷所構成。

超導體在正常態時，因為上方的磁場轉動，由法拉第感應定律，引起感應電場。所以在臨界溫度前，所測得的樣品的感應電壓與上方的轉動磁場有關；而在超導轉變溫區時，電阻急速消失，且磁通釘扎形成，且正在移動。磁通子有運動，就會產生電阻，再加上感應電流的影響，增加了磁通子運動的速度，也增加了電阻的大小。於是，當我們外加直流電源於樣品上後，對磁通子運動的影響更加明顯，也產生較大的電阻。所以隨著對樣品外加電流的增大，我們所測得的樣品感應電壓也隨之增大。

完全超導態之後，因為釘扎力的增強，磁通子運動趨緩，所以電阻銳減，相對的，感應電壓也降了下來。

以上就是本論文所討論的實驗結果與分析。

而對於本實驗之後相關的發展，我認為可以針對以下幾點作一系列的討論與研究：

1.磁場強度：

改變上方磁場強度，如更換磁鐵或是改變樣品與磁鐵的距離，以比較不同大小的磁場下，樣品的感應電壓變化。

2.磁場方向：

將原本上方的一對 S、N 極面分別朝下的磁鐵，換成一雙 S 極或 N 極接朝下的磁鐵，觀察外加直流電源分別正接或逆接於樣品上，感應電壓的變化。

3.樣品缺陷：

可以使用不同缺陷濃度的樣品，以觀察在不同濃度下，感應電壓的變化。

以上幾點是本實驗未來的展望，本實驗最大的誤差在於轉動磁場的頻率，若能將馬達轉速精準的控制與穩定，將可以觀察到更多穩定的磁通子運動與感應電壓關係的相關數據。

參考文獻

1. 張裕恒，李裕芝(1992)。 超導物理。台北市：儒林。
2. H.C. Yang, L.M. Wang, H.E. Horng, B. T. Su, J.H. Chen(2001). Hall effect and flux pinning of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y/\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ multilayers. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 226-230, 361-363.
3. J. C. Wei, J. L. Chen, L. Horng, T. J. Yang(1996). Magnetic force acting on a magnetic dipole over a superconducting thin film. Physical Review B, 54(21), 429-437.
4. T. Kono, M. Tomita, M. Murakami, T. Takizawa(2001). The viscous flux flow and flux creep induced by pulsed magnetic field in YBCO disk. Physica C, 357-360 , 537-540.
5. X. Leng, L. Qiu, Z.H. Wang, H. Luo, Y. Liu, S.Y. Ding, H. Zhang, J.W. Lin(2003). Flux pinning energy of $\text{YBa}_{1.9}\text{Na}_{0.1}\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Physica C, 386, 10-13.
6. Hojin Kim, Chanjoong Kim, Gyewon Hong, Jinho Joo(2002). A study on the microstructures and magnetic properties of the multi-seeded melt growth processed YBCO superconductors. Physica C, 372-376, 1159-1162.